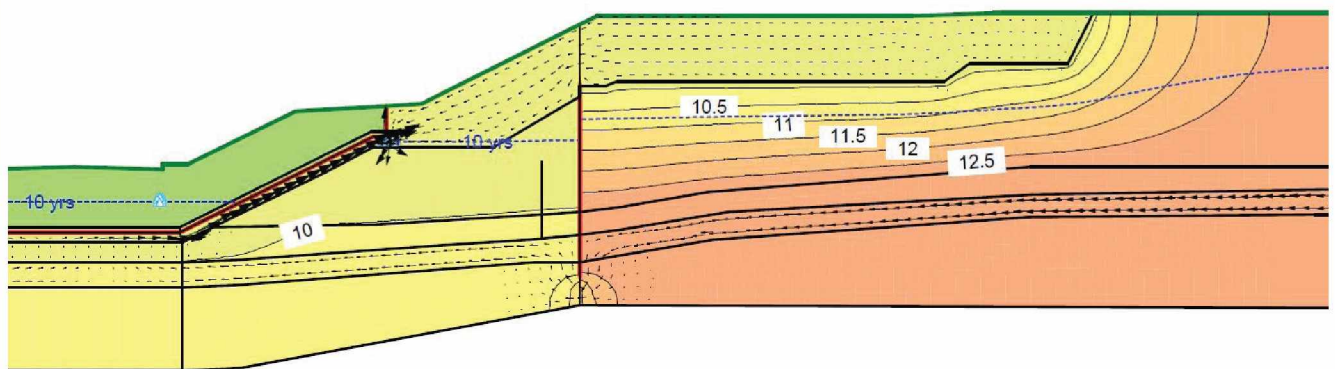


Pohjaveden hallinta alikulkupaikoilla

GEOTEKNIIKAN KÄSIKIRJA



Pohjaveden hallinta alikulkupaikoilla

Geotekniikan käsikirja

Liikenneviraston oppaita 1/2013

Liikennevirasto

Helsinki 2013

Verkkojulkaisu pdf (www.liikennevirasto.fi)

ISSN-L 1798-6591

ISSN 1798-6605

ISBN 978-952-255-225-9

Liikennevirasto

PL 33

00521 HELSINKI

Puhelin 020 637 373

Hankesuunnitteluosasto / Investointi

ELY-keskukset, Liikenne- ja infrastruktuuri - vastualueet
Liikennevirasto, Investointi- ja kunnossapitotoimialat

Asiasanat: pohjarakenteet, pohjarakennus, pohjavesi, vedenläpäisevyys, alikulkusilta, pohjaveden alentaminen, suotovirtaus

Pohjaveden hallinta alikulkupaikoilla, geotekniikan käsikirja

Tämä käsikirja on julkaistu Liikenneviraston oppaita -sarjassa ja on tarkoitettu hyödynnettäväksi kaikkien väylämuotojen maarakenteiden suunnittelussa. Käsikirjan ohjeet edustavat hyvää suunnittelutapaa mutta koska julkaisu on oppikirjamainen, sitä ei voida liittää sopimusasiakirjoihin velvoittavaksi ohjeeksi. Käsikirjan ohjeita voidaan hyödyntää laadittaessa hankekohtaisia laatuvaatimuksia, jotka perustuvat hankekohtaisiin suunnitteluperusteisiin ja Liikenneviraston ohjeisiin.

Tämä käsikirja keskittyy pohjavesiasioiden huomioon ottamiseen alikulkujen suunnittelun ja rakentamisen yhteydessä. Oppaassa tarkastellaan mm. maaleikkauksen kuivattamiseksi tehtävää pohjaveden alentamista ja siitä aiheutuvia ympäristöongelmia, joita esiintyy erityisesti kaupunkimaisessa rakentamisessa.

Käsikirjassa viitataan mitoituksen osalta eurokoodijärjestelmään, joka on otettu käyttöön Liikennevirastossa 1.6.2010. Eurokoodijärjestelmä koostuu eurokoodeista sekä vastaavista Liikenneviraston julkaisemista kansallisista liitteistä (LVM-liite) ja soveltamisohjeista (NCCI-sarja).

Yksikön päällikkö



Kari Lehtonen

Geoasiantuntija



Pentti Salo

LISÄTIETOJA: Pentti Salo
Liikennevirasto, Investointitoimiala

Opas saatavissa

LIIKENNEVIRASTON NETTISIVULTA OSOITTEESTA
www.liikennevirasto.fi/ohjeluettelo

3.1.2013

Kirje tiedoksi

Suunnittelu- ja konsulttitoimistojen liitto SKOL
Rakennusteollisuus RT
Infra ry
Suomen Kuntaliitto
Tekniset yliopistot/korkeakoulut ja ammattikorkeakoulut
VTT
G10 -kaupungit
Tie- ja geokonsultit
Materiaalin toimittajat
Oppaan laatijat ja työhön osallistuneet asiantuntijat
Liikenneviraston investointi- ja kunnossapitotoimialan osastot, kirjasto
Rakennuttamisosaston ja Väylätekniikkaosaston yksiköt
Liikenneviraston ja ELY-keskusten geoasiantuntijat

Esipuhe

Oppaan on laatinut Aalto-yliopiston opinnäytetyön pohjalta Johanna Martio ja sen ohjaajina ovat olleet Seppo Hakala, Heikki Komulainen ja Heikki Akkanen VR Track Oy:stä. Tilaajan puolelta työtä on valvonut Ville-Pekka Lilja Liikennevirastosta.

Helsingissä tammikuussa 2013

Liikennevirasto
Investointi/Suunnittelun ohjaus

Sisällysluettelo

MERKINNÄT	7
MÄÄRITELMIÄ	8
1 JOHDANTO	10
2 MAAPERÄ JA KALLIOPERÄ	11
3 POHJAVESITILANTEEN TUTKIMINEN	13
3.1 Arvioidut ympäristöhaitat	13
3.2 Pohjatutkimukset	13
3.3 Pohjavedenottamot ja talousvesikaivot	16
3.4 Pohjaveden laatu	16
3.5 Geofysikaaliset tutkimusmenetelmät	16
3.6 Maanäytteen ja laboratoriokokeet	17
3.7 Koekuopat ja koekaivo	18
3.8 Kairaukset	19
3.8.1 CPTU-kairaus	19
3.8.2 Porakonekairaus	21
3.8.3 Muut kairaukset	21
3.9 Pohjavedenpinnan tutkiminen	21
3.10 Hydrauliset ominaisuudet	22
3.10.1 Slug-testi	22
3.10.2 Antoisuuspumppaus	25
3.10.3 Koepumppaus	26
3.10.4 Pohjaveden virtauksen muita maastomittausmenetelmiä	29
3.11 Ympäristön seuranta ja katselmukset	29
4 POHJAVEDEN ALENNUKSEN SUUNNITTELU	31
4.1 Työnaikainen pohjaveden alennustarve	31
4.2 Käyttötilan aikainen pohjaveden alennustarve	31
4.3 Mallintaminen	32
4.3.1 Suotovirtausmallinnus	32
4.3.2 Painumalaskelmat	33
4.4 Alennustekniikat	34
4.5 Vaikutusten rajoittaminen	35
4.6 Alikulun rakenneratkaisut	35
4.7 Hydraulinen murtuminen	36
4.7.1 Nosteen aiheuttama murtuminen	36
4.7.2 Hydraulisen nousun ja pohjavesieroosion aiheuttama murtuminen	36
LÄHDELUETTELO	38
LIITTEET	
Liite 1 Analyttiset menetelmät	

Merkinnät

A	ympyrän säde
B	suorakulmaisen kaivannon leveys
b	akviferin saturoituneen maakerroksen paksuus
c	kerroin
d _{LL}	läpäisyprosenttia 10 vastaava raekoko
d _{LL}	läpäisyprosenttia 60 vastaava raekoko
e	vesistön rannan ja kaivon/kaivoryhmän painopisteen välinen etäisyys
F	varmuusluku
f	suodatinkerroksen vastaanottokyky
f _s , f _t	vaippakitka
H	vettä läpäisevän maakerroksen paksuus
H, H _o , h	hydraulinen korkeus, hydraulinen potentiaali
h _o	alkuperäinen pietsometrinen korkeus
h _o '	pohjaveden kanssa kosketukseen tulevan siiviläputken osan pituus
h _e	asemakorkeus
h _p	painekorkeus
h _w	kaivon pietsometrinen korkeus
i	hydraulinen gradientti
k	vedenläpäisevyyskerroin
L	matka
L	suorakulmaisen kaivannon pituus
L _e	havaintoputken siiviläosan pituus
N _d	ekvipotentiaaliviivojen välien lukumäärä
N _f	virtauskanavien lukumäärä
n	huokoisuus
Q	virtaama, pumppausvirtaama
q	salaojasta pumpattava vesimäärä
q _c , q _t	kärkivastus
r	havaintoputken säde
r _w	kaivon säde
R	pumppauksen vaikutussäde
R	havaintoputken siiviläosan ja sitä mahdollisesti ympäröivän soratäytön säde
s	pohjaveden suunniteltu alennus
T _o	aika, joka kestää vedenpinnan nousta tai laskea 37 % alkuperäisestä vedenpinnan muutoksesta
t	aika
U	tasaisuusluku
U _a , U _w , u, u _o	huokospaine
AVI	aluehallintovirasto
ELY-keskus	Elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus
RIL	Suomen Rakennusinsinöörien Liitto ry
SYKE	Suomen ympäristökeskus
VL	Vesilaki

Määritelmiä

Pohjavesi

Pohjavesi on vettä, joka täyttää kokonaan maa- tai kallioperän huokostilan ja muut avoimet tilat vedellä kyllästyneessä vyöhykkeessä. Pohjavedenpinnan yläpuolella kyllästymättömässä vyöhykkeessä olevaa vettä kutsutaan maavedeksi. Pohjavedenpinta on määritelty siksi korkeustasoksi, jolla maaveteen kohdistuva paine on vastaava kuin ilmanpaine (Vesitalouden verkkokirja, 2010).

Orsivesi

Vettä läpäiseviä kerrostumia saattaa erottaa vesitiivis maakerros. Orsivesi on tämän ylemmän tiiviin, vettä pidättävän maakerroksen päälle kerääntynyttä vettä, joka on varsinaisen pohjavesiesiintymän yläpuolella. Tiiviin maakerrostuman alla kyllästyneessä vyöhykkeessä oleva vesi on pohjavettä. Orsiveden- ja pohjavedenpinnan korkeustasot ja vastaavat vedenpaineet saattavat poiketa huomattavasti toisistaan.

Akviferi

Pohjavettä sisältävää ja vettä hyvin läpäisevää, hydraulisesti yhtenäistä geologista muodostumaa eli pohjavesiesiintymää kutsutaan akviferiksi. Akviferit voidaan jakaa kahteen pääluokkaan: vapaat ja paineelliset akviferit. Kun pohjavedenpinta ei rajoitu yläpuolelta vettä läpäisemättömään maakerrokseen, akviferi on vapaapintainen ja paine vedenpinnassa on ilmakehän paineen suuruinen. Vapaassa akviferissa pohjavedenpinta muodostaa esiintymän yläreunan. Akviferin alareuna voi rajoittua vettä läpäisemättömään tai heikosti läpäisevään pohjaan. Vapaapintaisen akviferin yläpuolella voi olla paikoitellen verrattain ohut huonosti vettä läpäisevä tai läpäisemätön maakerros (esim. savea), jonka päälle voi kerääntyä vapaapintaista orsivettä.

Jos pohjavettä hyvin läpäisevä maakerrostuma rajoittuu ylä- ja alapuolella vettä läpäisemättömään, yhtenäiseen maakerrostumaan (akvikludiin), kyseessä on paineellinen akviferi, jonka pinnassa paine on ilmakehän painetta suurempi. Paineelliseen akviferiin asennetussa havaintoputkessa vedenpinta nousee akviferin pietsometriselle tasolle akvikludikerrokseen tai sen yläpuolelle. Paineellista pohjavettä kutsutaan arteesiseksi, jos vedenpinta havaintoputkessa nousee maanpinnan yläpuolelle (Airaksinen, 1978).

Vedenläpäisevyys

Maan vedenläpäisevyydellä (hydraulisella johtavuudella) tarkoitetaan veden virtausnopeutta maa-aineksessa hydraulisen putouksen ollessa yksi. Vesimäärä, joka virtaa aikayksikössä tietyn poikkileikkauksen läpi vedellä kyllästyneessä maassa, on suoraan verrannollinen hydrauliseen gradienttiin.

Varastokerroin ja vedenjohtokyky

Akviferin eli pohjavesiesiintymän varastokerroin ilmaisee siihen varastoituvan vesimäärän ja vastaavien pohjavedenpintojen muutosten keskinäisen riippuvuussuhteen. Varastokerroin on verrannollinen maakerroksen huokostilavuuteen. Vedenjohtokyky kertoo akviferin vedenjohtavuuden edustaen esiintymän koko paksuutta.

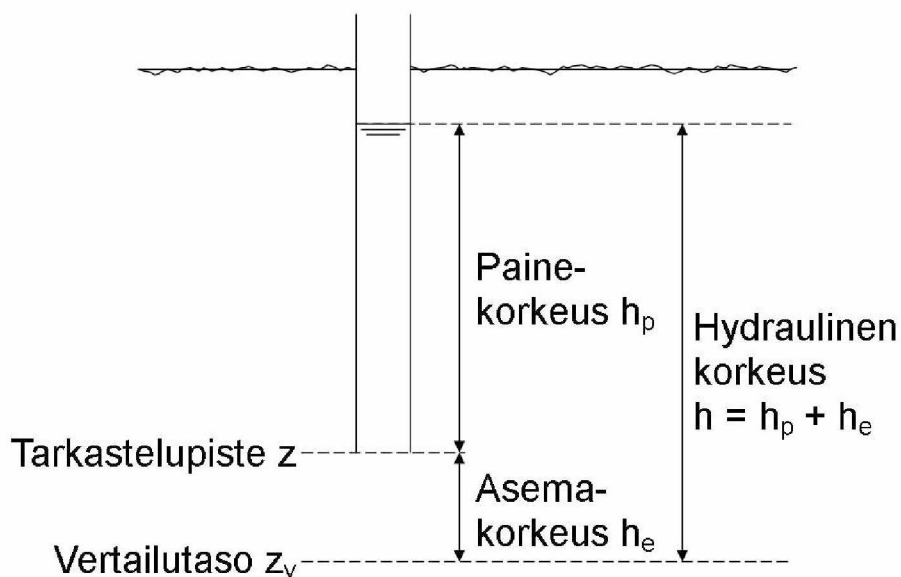
Maan anisotrooppisuus ja isotrooppisuus

Maaperän anisotrooppisuus on pääosin maan kerroksellisuudesta johtuva ominaisuus. Siihen vaikuttavat maakerrosten syntyessä muodostunut rakenne ja tiivistymisen aiheuttama vedenläpäisevyyssominaisuuksien pystysuuntainen vaihtelu. Anisotrooppisessa maassa vedenläpäisevyys on erisuuruinen vaakasuunnissa ja pystysuunnassa. Akviferien anisotrooppisuuden aste vaihtelee laajasti ja on määräytynyt muodostuman geologisen syntyvän mukaan. Suomessa akviferit ovat mannerjäätikön muovaamia, ja siten yleisimmin huomattavan anisotrooppisia.

Maan vedenläpäisevyyden ollessa sama niin vaaka- kuin pystysuunnassakin maa on isotrooppista (anisotrooppisuuden arvo on 1). Isotrooppisuus on kuitenkin erittäin harvinaista luonnontilaisissa maakerrostumissa. Maakerrosten anisotrooppisuuden myötä vaihteleva vedenläpäisevyys vaikuttaa merkittävästi kerrostumassa tapahtuvaan suotovirtaukseen.

Paine-, asema- ja hydraulinen korkeus

Painekorkeus kuvaa korkeutta, johon vedenpinta nousee tarkasteltavaan pisteeseen asennetussa havaintoputkessa. Asemakorkeus taas kuvaa tarkasteltavan pisteen etäisyyttä valitusta vaakasuorasta vertailutasosta. Hydraulinen korkeus eli hydraulinen potentiaali h [m] lasketaan painekorkeuden ja asemakorkeuden summana. Paine-, asema- ja hydraulinen korkeus on havainnollistettu kuvassa 1.



Kuva 1. Paine-, asema- ja hydraulisen korkeuden määrittely.

1 Johdanto

Ratojen, teiden ja katujen kanssa risteäviä alikulkuväyliä suunniteltaessa kohteen pohjavesiolosuhteet, alittavan väylän korkeusasema, alikulun kuivatusratkaisu sekä pohjaveden alentamisesta aiheutuvat ympäristövaikutukset kuuluvat tärkeimpiin suunnitteluasioihin. Alikulun kuivatuksen aiheuttaa pohjaveden alenemista, jonka suuruus ja laajuus määräytyvät pääosin paikallisten hydrogeologisten olosuhteiden mukaan. Pohjaveden alentamisesta aiheutuu usein merkittäviä ympäristövaikutuksia. Pohjavesitilanteen tutkiminen tulee aloittaa riittävän aikaisessa suunnitteluvaiheessa, jotta vältetään suurilta ja usein kalliilta virheratkaisuilta.

Tämä opas keskittyy pohjavesiasioiden huomioon ottamiseen alikulkujen suunnittelun ja rakentamisen yhteydessä. Oppaassa tarkastellaan mm. maaleikkauksen kuivatamiseksi tehtävää pohjaveden alentamista ja siitä aiheutuvia ympäristöongelmia. Erityisesti kaupunkimaisessa rakentamisessa kohteen ympärillä olevan pohjavesitilanteen säilyttäminen asettaa monella tavalla rajoituksia alikulun rakentamiselle.

Oppaassa tarkastellaan pohjaveden alennuksen suunnittelua ja siinä huomioon otettavia asioita alikulkukohteissa sekä esitellään erilaisia tutkimusmenetelmiä, joilla voidaan tarkastella pohjavesiolosuhteita sekä pohjaveden alentamisen yleisiä reuna-ehtoja sekä ympäristövaikutuksia.

2 Maaperä ja kallioperä

Maaperän vapaa vesi pääsee liikkumaan maaperän huokostilassa. Kyllästyneessä tilassa pohjavedenpinnan alapuolella maaperän huokokset ovat veden täyttämiä ja pohjavedenpinnan yläpuolella, kyllästymättömässä tilassa huokostilassa on veden lisäksi myös ilmaa.

Karkearakeisille maalajeille (hiekalle ja soralle, soramoreenille) on ominaista hyvä vedenjohtavuus ja pienehkö kapillaarisuus. Ne pystyvät varastoimaan vettä hyvän vedenjohtokykynsä ja suuren huokoisuutensa takia, joten karkearakeisista maakerrokista on muodostunut pohjaveden akvifereja.

Moreenimaalajien vedenläpäisevyyden vaihtelut aiheutuvat suuresti moreeniaineksen raakoostumuksesta. Moreenikerrostumien rakenteellisella tiiviydellä on suuri merkitys vedenläpäisevyyteen. Moreenimaalajeista sora- ja hiekkamoreenilla on suurimmat vedenläpäisevyyssarvot.

Hienorakeisilla maalajeilla (savi, siltti, lieju) on heikko vedenjohtavuus ja varsinkaan savessa vesi ei pääse liikkumaan juuri lainkaan. Hienorakeisista maakerroksista mitattu vesipinta ei ole pohjavedenpinnan tasolla, kuten ei myöskään ojasta tai purosta tai tms. mitattu vedenpinta.

Suomen kallioperässä pohjavesi voi esiintyä ja liikkua oleellisesti vain pitkin erilaisia rakoja, halkeamia ja niiden muodostamia ruhjeita. Peruskalliomuodostumissa esiintyy ainakin jonkin verran suoraviivaisia ja pitkänomaisia rikkoutumis- eli ruhjevyyhykkeitä. Ruhjeet varastoivat pohjavettä ja muodostavat kallioperän varsinaiset pohjavesialtaat. Ruhjeiden pohjavesialtaat ovat pitkänomaisia, joskin huomattavasti ruhjetta lyhyempiä (Mälkki, 1986).

Kallionpintaan ulottuvien rakojen välityksellä kalliopohjavesi on yhteydessä kallion päällä olevien maakerrosten pohjaveteen. Kalliopohjaveden ja maakerrosten pohjaveden välinen yhteys riippuu kallion rakoilu tiheydestä ja kallion pintaan rajoittuvan maakerroksen vedenjohtavuudesta. (Mälkki, 1986)

Vedenläpäisevyyškertoimen k -arvojen, kokonaishuokoisuuden ja ominaisantoisuuden S_y suuruusluokkia on esitetty maalajeille taulukossa 1 ja joillekin kivilajeille taulukossa 2 (SYKE, 2010a).

Taulukko 1. Maalajien vedenläpäisevyyden, kokonaishuokoisuuden ja ominaisantoi-
suuden suuruusluokka-arvoja (SYKE, 2010a).

Maalaji	Vedenläpäisevyys- kerroin k [m/s]	Kokonaishuokoisuus [%]	Ominaisantoisuus S _y [%]
Sora	10 ⁻¹ ...10 ⁻⁴	25...50	25...37
Karkea sora	> 1	24...36	23
Keskikarkea sora	1...10 ⁻²		24
Hieno sora	1...10 ⁻³	25...38	25
Hiekkainen sora	10 ⁻² ...10 ⁻⁶		
Hiekka	10 ⁻² ...10 ⁻⁶	25...50	25...38
Karkea hiekka	10 ⁻¹ ...10 ⁻⁴	30...46	27
Keskikarkea hiekka	10 ⁻² ...10 ⁻⁵	30...40	28
Hieno hiekka	10 ⁻³ ...10 ⁻⁶	26...53	10...28
Siltti	10 ⁻⁵ ...10 ⁻⁹	35...61	8
Karkea siltti	10 ⁻⁴ ...10 ⁻⁶	30...35	
Hieno siltti	10 ⁻⁵ ...10 ⁻⁸	40...50	
Savi	< 10 ⁻⁸ ...10 ⁻¹⁰	34...70	3...10
Laiha savi		40...60	
Lihava savi		60...75	
Moreeni		20...55	
Soramoreeni	10 ⁻⁴ ...10 ⁻⁷		16
Hiekkamoreeni	10 ⁻⁶ ...10 ⁻⁸		16
Silttimoreeni	10 ⁻⁷ ...10 ⁻¹⁰		6

Taulukko 2. Joidenkin kivilajien hydrogeologisia parametreja (SYKE, 2010a).

Kivilaji	Vedenläpäisevyys- kerroin k [m/s]	Kokonaishuokoisuus [%]	Ominaisantoisuus S _y [%]
Runsaasti rakoilevat syvä- ja metamorfi- set kivet	10 ⁻⁴ ...10 ⁻⁶	< 10	
Graniitti, gneissi	10 ⁻⁴ ...10 ⁻¹¹	<10	12...26
Liuske	< 10 ⁻⁸	1...10	
Rakoilematon, se- mentoitetun hiekka- kivi	< 10 ⁻⁸		
"Ehyet" syvä- ja me- tamorfiset kivet	< 10 ⁻⁹	< 5	

3 Pohjavesitilanteen tutkiminen

3.1 Arvioidut ympäristöhaitat

Alikulkua varten tehtävä maaleikkaus muuttaa yleensä pysyvästi maaperän pohjavesisuhteita ja -virtausta. Pohjaveden alennuksen ympäristövaikutukset voivat olla merkittäviä, varsinkin koheesiomaa-alueilla.

Yleisiä pohjaveden alentamisesta aiheutuvia ympäristövaikutuksia ovat:

- kasvillisuuden heikkeneminen ja kuoleminen
- kaivojen vedenantoisuuden ja veden laadun heikkeneminen sekä kaivojen kuivuminen
- puisten perustusrakenteiden ja paalujen lahoaminen
- kokoonpuristuvien maakerrosten varaan perustettujen rakennusten ja rakenteiden painuminen ja siten mahdollisesti rakennusten sekä vesi- ja viemärijohtojen vaurioituminen
- alitettavan maanvaraisen radan tai väylän painuminen
- paalukuormien kasvu painuvalla alueella
- teräspaalujen korroosio-olosuhteiden muuttuminen, yleensä korroosion nopeutuminen
- eroosio.

Mikäli alikulun maaleikkauksesta aiheutuvan pohjaveden aleneman arvioidaan aiheuttavan haittaa ympäristölle, selvitetään tarkemmin kuinka laajalle pohjaveden alenema vaikuttaa, maaleikkaukseen suotautuvien vesimäärien suuruus ja pohjaveden aleneman arvioidut vaikutukset lähialueen rakennuksiin ja rakenteisiin.

3.2 Pohjatutkimukset

Alikulun suunnittelua ja rakentamista varten tulee selvittää jo alustavassa suunnitteluvaiheessa riittävän laaja-alaisesti alueen pohjavesiolosuhteet, kuten maaperän kerrorakenne, pohjavedenpinnan taso ja korkeusvaihtelu, pohjaveden virtaussuunta, maaperän vedenjohtavuusominaisuudet ja pohjaveden mahdollinen paineellisuus. Tarveselvitysvaiheessa käytetään suurimmaksi osaksi jo olemassa olevaa tietoa ja tutkimuksia. Uudet tutkimukset ajoitetaan yleensä yleissuunnitteluvaiheesta eteenpäin. Kohteen pohjavesiolosuhteiden tutkimusten ajoittamisessa eri suunnitteluvaiheisiin voidaan soveltaa julkaisua Radanpidon ympäristöohje (Liikenneviraston ohjeita 28/2010), vaikka ohje ei koske pelkästään alikulkukohteita. Julkaisun liitteenä on myös ohjekortti 4, jossa ohjeistetaan, minkälaisia pohjavesiä koskevia lähtötietoja on saatavissa mistäkin virastoista, kartoista ym.

Alikulkua varten tehtävän maaleikkauksen pohjatutkimuksien osalta noudatetaan seuraavaa ohjetta:

- Geotekniset tutkimukset ja mittaukset, TIEH 2100057–08.

Hyödyllistä lisätietoa antavat myös julkaisut:

- Tieleikkauksen pohjatutkimukset, Geotekniikan informaatiojulkaisuja, Tielaitoksen selvityksiä 79/1995
- Siltojen pohjatutkimukset, Geotekniikan informaatiojulkaisuja, TIEL 32000537.

Alla on esitelty pohjavesitilanteen tarkasteluun liittyvät päävaiheet ennen alikulun varsinaisen suunnittelun aloittamista. Osa niistä voidaan tehdä myös suunnittelun aikana. Alikulkukohteen suunnittelussa pitää tehdä riskikartoitus, jonka perusteella voidaan keskittyä tärkeimpiin päävaiheisiin. Monet päävaiheet menevät päällekkäin toistensa kanssa ja niiden järjestys saattaa vaihdella riippuen kohteesta. Kaikkia päävaihteita ja niiden kaikkia kohtia ei myöskään tarvita kaikissa kohteissa.

- perehtyminen aikaisempaan tutkimus- ja kartta-aineistoon
- maastotarkastelut
- lähistön rakennusten ja rakenteiden perustamistapojen selvittäminen
- kaivokartoitus
- mahdollisten lähteiden kartoitus
- purkautuvien vesimäärien ja virtaamien mittaukset
- mahdollisten pilaantuneiden maiden kartoitus, vesinäytteiden otto
- geofysikaaliset tutkimukset pohjavedenpinnan, maakerrosrakenteen sekä kalliopinnan ja kalliolaadun toteamiseksi
- kairaukset, maanäytteiden otto ja koekuoppien teko, laboratoriokokeet
- pohjaveden havaintoputkien asennus, putkimittaukset tai lyhytaikaiset antoisuuspumppaukset
- pohjaveden virtauksen ja alenemisen likiarvolaskelmien tekeminen
- havaintoputkien seurantaohjelman laatiminen ja toteutus
- lähistön rakennusten ja rakenteiden alkukatselmus ja painumatarkkailun seurantaohjelman laatiminen ja toteutus
- koepumppauspaikan tai koekaivon paikan valinta pohjatutkimustulosten perusteella ja rakentaminen
- koepumppauksen valmistelut ja havainto-ohjelman tekeminen
- koepumppaus
- tutkimusten raportointi
- pohjavesimallinnus
- rakentamisvaiheen pohjaveden alentamisen suunnittelu
- pohjaveden hallintasuunnitelma.

Tutkimusten edetessä tehdään jatkuvasti tulosten tulkintaa, joiden avulla päätetään seuraavista työvaiheista, tutkimuksista ja niiden laajuudesta. Tutkimusmenetelmien valinta riippuu mm. maasto-olosuhteista ja pohjavedenpinnan korkeudesta. Pohjaveden alentamisessa tarvittavia pumppausmääriä ja pumppauksen ulottuvuutta voidaan alustavasti arvioida erilaisilla likimääräiskaavoilla, joita on koottu liitteeseen 1 Analyttiset menetelmät. Pohjatutkimusten, selvitysten ja suunnitelmien perusteella joudutaan myös ratkaisemaan mahdollisen ympäristöluvan tarve pohjaveden alentamisen yhteydessä. Erilaisilla pohjatutkimuksilla, maastossa tehtävillä mittauksilla ja selvityksillä tulee selvittää mm. seuraavat asiat:

- luonnolliset tekijät:
 - maanpinnan muodot
 - maa- ja kallioperän laatu, erityisesti niiden vedenjohtavuusominaisuudet (kalliokynnykset, rikkonaisuus sekä kivilajit, jotka erityisesti voivat vaikuttaa vedenlaatuun)
 - pohjaveden laatu ja määrä
 - pohjavedenpinnan korkeudet ja pohjaveden virtaussuunnat
 - vesien imeytymistä ja virtausta ohjailevat tekijät (kalliokynnykset, savikerrokset, pohjavedenjakaja-vyöhykkeet)
 - alueen luonnontilaisuus
 - suunnittelualueen vaikutusalueella olevat pintavesistöt (joet, järvet, lammet, lähteet, luonnonarvoiltaan merkittävät soistumat)
- pohjavesialueet ja perustiedot pohjavesialueesta
- pohjavesialueen merkitys talousvedenottoon
- alikulun sijainti suhteessa pohjavesialueisiin, vedenottamoihin, talousvesikaivoihin ja tärkeisiin pintavesistöihin
- alikulun sijainti pohjaveden virtaussuuntaan nähden
- pohjavedenottamot, vedenottotiedot ja talousvesikaivot
- pohjaveden havaintopisteet
- lähistön rakennusten ja rakenteiden perustamistavat. Tulee selvittää alimman pohjavedenpinnan taso, jos kohteen vaikutusalueella on puuperustuksia
- alueilla, joilla epäillään aiheutuvan painumia ja joilla on rakennuksia ja rakenteita, tulee ennen rakentamistöiden alkua suorittaa katselmus rakennusten nykyisen kunnon selvittämiseksi ja suorittaa painumatarkkailua rakentamistöiden aikana
- pohjaveden alentamisen ympäristövaikutusten (kuten alennuksen ulottuman, poistettavan vesimäärän ja mahdollisten painumien) selvittäminen
- saastuneiden maa-alueiden kartoitus
- muut riskitekijät ja riskikohteet.

Suunnitellulle alikulkupaikalle tulee aluksi asentaa vähintään yksi pohjavesiputki, joka ulottuu karkeisiin maakerroksiin, sekä ottaa alikulun molemmilta puolilta tarvittaessa jatkuvia maanäytteitä, jotka ulottuvat riittävän syväälle kuivatustason alapuolelle. Näytteiden paikat määritetään kairaustietojen mukaan. Lisäksi tulee tehdä esim. CPTU-kairauksia, (mikäli maa on kivetöntä) vettä johtavien maakerrosten löytämiseksi. Alikulkuleikkauksen ulottuessa kallioon tai kalliota peittävään, karkearakeiseen, vettä johtavaan maakerrokseen tulee tutkia myös kallion rakoilua ja veden virtausta raoissa.

Maakerrosten vedenläpäisevyydet tulee alustavasti määrittää maanäytteiden rakeisuuden, laboratoriokokeiden ja likimääräisten laskentakaavojen perusteella. Näiden sekä pohjavedenpinnan mittaustulosten perusteella määritetään jatkotutkimustarve. Täydentäviä tutkimuksia ovat esim. uusien maanäytteiden ottaminen, useampien pohjavesiputkien asentaminen, antoisuusmittaukset ja slug-testit. Slug-testit ja laboratoriokokeet eivät välttämättä anna kuvaa koko akviferin toiminnasta, vaan pelkästään havaintoputken siivilän ympäriltä tai näytteenottopaikan lähiympäristöstä. Slug-testien tekeminen on perusteltua alueen vedenjohtavuuden selvityksessä, monesti koepumppauksen ohella tai joskus pumppauksen sijasta, sillä slug-kokeet ovat edullisempia sekä helpommin ja nopeammin tehtävissä kuin koepumppaus. Määritettäessä

maakerrosten vedenläpäisevyyttä slug-testien avulla, niitä tulee tehdä riittävän monesta kohdasta hyvin edustavasta paikasta ja maakerroksesta. Nämä edustavat paikat määritetään kairausten, maanäyte- ja karttatietojen perusteella.

Vaativissa pohjavesiolosuhteissa ja ympäristövaikutuksiltaan merkittävässä tapauksissa tulee vedenläpäisevyydet arvioida kuitenkin aina koepumppauksen perusteella, joka on slug-testejä oleellisesti luotettavampi menetelmä kuvaamaan akviferin ominaisuuksia laajemmalla alueella. Ennen koepumppausta voidaan maakerrosten vedenjohtavuutta selvittää lyhytaikaisten antoisuusmittausten avulla.

3.3 Pohjavedenottamot ja talousvesikaivot

Pohjavesiottamoista ja kiinteistöjen kaivoista saatavat vesimäärät eivät saa vähetä haitallisesti eikä niiden veden laatu heiketä merkittävästi alikulun rakentamisen takia ilman ympäristöviranomaisen lupaa. Usein varaudutaan kaivojen korvaamiseen, jos kaivo on vaarassa kuivua. Kaivokartoituksessa alueella sijaitsevat kaivot merkitään kartalle sekä mitataan kaivojen syvyydet, vedenpinnan ja pumppujen imutasojen korkeudet. Samalla arvioidaan kaivojen tekninen kunto, selvitetään kaivon ympäristössä sijaitsevat mahdollisesti pohjavettä likaavat lähteet sekä selvitetään kaivon käyttötarkoitus, veden laatu ja ottomäärä. Haastatteleamalla kaivon omistajaa saadaan käyttökelpoista tietoa veden riittävydestä ja laadusta. Kaikista vaikutusalueen kaivoista tehdään kaivokortit. Kaivokortista on esimerkki Suomen vesiyhdistyksen Pohjavesitutkimusoppaassa (2005). Pohjavedenottamoiden koepumppaustiedot ja käytön aikaiset havainnot on selvitettävä.

3.4 Pohjaveden laatu

Pohjaveden alentaminen muuttaa yleensä pohjaveden paikallista virtausta sekä mahdollisesti pohjaveden laatua. Mikäli on aihetta epäillä pohjaveden aiheuttavan alikulun teräsrakenteiden korroosiota tai heikentävän betonirakenteiden kestävyyttä, tulee pohjaveden laatu tutkia. Pohjaveden laatu pitää tutkia myös, jos alikulun ympäristöstä löytyy kartoituksessa saastuneita maa-alueita.

Pohjaveden laadun tutkimuksesta ja näytteenotosta löytyy ohjeita Suomen vesiyhdistyksen kirjasta Pohjavesitutkimusopas, Käytännön ohjeita (2005) sekä julkaisusta Pohjavesinäytteenotto, Nykytila ja kehitystarpeet, Suomen ympäristö 48/2008.

3.5 Geofysikaaliset tutkimusmenetelmät

Geofysikaalisia menetelmiä käytetään yleensä esitutkimusmenetelmänä pohjavesitutkimuksissa. Geofysikaalisten mittausten perusteella on helpompi kohdentaa oikeisiin kohteisiin yksityiskohtaisemmat ja kalliimmat tutkimukset. Menetelmiä käytetään maaperän rakenneselvityksiin, pohjavettä johtavien kerrostumien paikantamiseen ja kalliopinnan topografian selvittämiseen.

Pohjavesitutkimuksissa käytettyjä menetelmiä ovat:

- maatutkaluotaus

- seisminen refraktioluotaus
- sähköinen vastusluotaus
- VLF-luotaus
- geofysikaaliset matalalentomittaukset
- aeromagneettiset mittaukset
- aerosähkömagneettiset (AEM) mittaukset
- aeroradiometriset mittaukset
- painovoimamittaukset.

Näistä menetelmistä ja mittauksista on lisätietoa mm. Suomen vesiyhdistyksen Pohjavesitutkimusoppaassa.

3.6 Maanäytteet ja laboratoriokokeet

Näytteiden ottamisen osalta sovelletaan julkaisua SFS-käsikirja 179-3; Geotekninen tutkimus ja koestus. Osa 3: Näytteenotto, pohjavesimittaukset ja yleisesti Suomessa käytettävät kenttäkokeet. Menetelmäkuvaukset soveltamisohjeineen 2009, Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. Soveltamisohjeena käytetään julkaisua Kairausopas III, Maanäytteiden ottaminen geoteknillisiä tutkimuksia varten, Suomen geoteknillinen yhdistys ry.

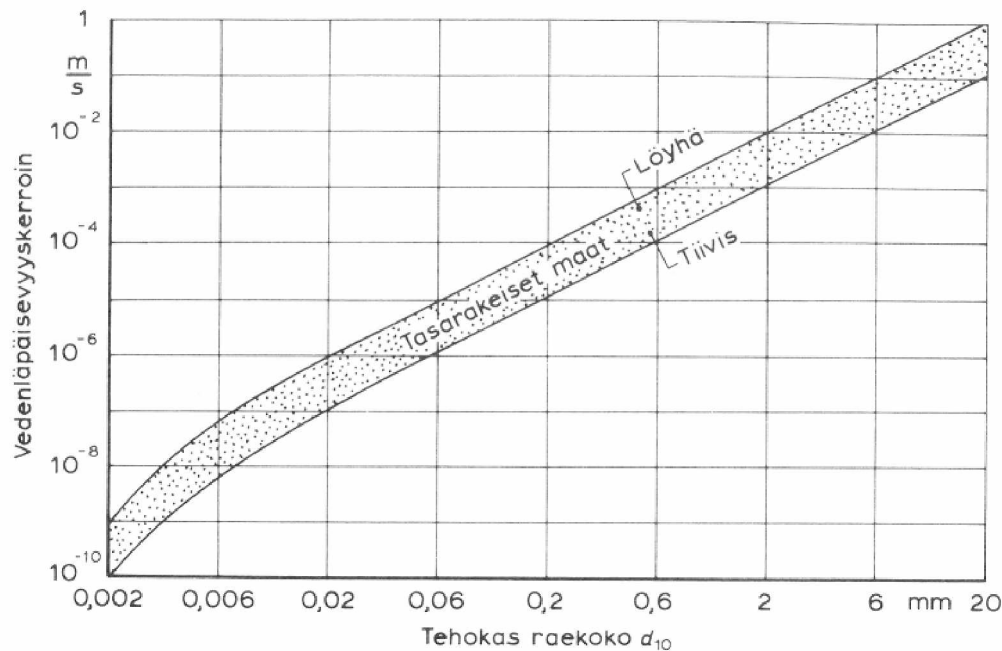
Sekä maa- että kallionäytteet voidaan ottaa joko yksittäisinä näytteinä tietyltä syvyydeltä tai jatkuvana sarjana. Ennen jatkuvan näytteen ottamista täytyy valittu paikka kairata, jotta saadaan maakerrosrakenne selville. Kairauksen perusteella määritetään kuinka tiheästi näytteitä tulee ottaa. Vaarana on, että jatkuvaksi tarkoitettu näytesarja otetaan liian harvalla näytevälillä, jolloin ei saada edustavaa kuvaa maakerrosrakenteesta.

Maanäytteistä analysoidaan laboratoriossa rakeisuus ja maalaji. Maanäytteiden rakeisuuden avulla voidaan arvioida vedenläpäisevyyttä k (m/s) mm. Hazenin kaavan (1) (Airaksinen, 1978) avulla.

$$k = 0,01157 \cdot d_{10}^2 \quad (1)$$

d_{10} on läpäisyprosenttia 10 vastaava tehokas raekoko [mm].

Hazenin kaava on voimassa, jos tasaisuusluku $U = d_{60}/d_{10}$ on pienempi kuin 5 (Airaksinen, 1978) ja tehokas raekoko d_{10} on suunnilleen välillä 0,1 - 3,0 mm (Fetter, 2001). Hazenin kaavaa voidaan haluttaessa muuntaa ottamaan paremmin huomioon maaperän rakeisuus ja veden lämpötila käyttämällä näitä kuvaavia empiirisiä kertoimia. Muita empiirisiä kaavoja vedenläpäisevyydelle ovat kehittäneet mm. Beskow ja Taylor. Tasarakeisille maalajeille voidaan karkeasti arvioida vedenläpäisevyys myös kuvan 2 avulla.



Kuva 1. Vedenläpäisevyyskerroimen arviointi tasaraakeisissa maissa tehokkaan raekoon d_{10} avulla (RIL 157-I, 1985).

Laboratoriossa voidaan vedellä kyllästyneestä maanäytteestä tehdä vedenläpäisevyyden määrittäminen vakio- tai muuttuvaputouskokeella. Vakioputouskokeessa käytetään muuttumatonta veden painekorkeutta. Tämä menetelmä soveltuu karkearakeisille kittamaalajeille, joilla on melko suuri vedenjohtavuus. Muuttuvaputouskokeessa painekorkeus on muuttuva, ja sillä määritetään hienojakoisten, huonosti vettä läpäisevien maalajien vedenläpäisevyys. (Vakkilainen, 2007). Vedenläpäisevyyskerroin voidaan arvioida välillisesti myös ödometrikokeen tulosten perusteella.

3.7 Koekuopat ja koekaivo

Koekuoppaa voidaan pitää eräänlaisena koekaivantona. Koekuopan avulla voidaan parhaiten selvittää maaperän kerrosrakenne, pohjaveden virtausta ja usein myös pohjavedenpinta sekä mahdollisesti kallionpinta. Kaikki havainnot näistä tulee kirjata koekuoppakorttiin mieluiten valokuvien kera. Koekuopan auki kaivamisen ja näytteiden oton jälkeen tulee kuoppaa pitää auki jonkin aikaa ja seurata, miten pohjavesi alkaa suotautua sinne. Mikäli vettä tulee kuoppaan runsaasti, on perusteltua asentaa kuoppaan koekaivo. Koekaivo voi olla yksinkertaisimmillaan alapäästään rei'itetty muoviputki, jonka siiviläosa ympäröidään karkealla maa-aineksella, josta hienoaines on poistettu. Kaivon siiviläosan tulee olla siinä maakerroksessa, josta suotautuu eniten vettä ja jota halutaan tutkia. Kun pohjavedenpinta on koekaivon asentamisen jälkeen palautunut ennalleen, suoritetaan koekaivosta pienimuotoinen koepumppaus, jonka avulla saadaan parempi arvio maaperän vedenjohtavuudesta. Kyseinen koepumppaus kestää muutamasta tunnista noin viikkoon, jonka aikana ja jälkeen mitataan pohjavedenpinnan tasoa kaivon lisäksi lähialueen pohjavesiputkista ja yksityiskaivoista.

3.8 Kairaukset

Kairausten avulla voidaan tutkia muun muassa vettä johtavien maakerrosten paksuutta, tiiviyttä ja raekoostumusta. Kairausten yhteydessä otettavien maanäytteiden avulla voidaan tarkentaa näitä tietoja. Kairausten avulla voidaan myös selvittää kallionpinnan korkeusasema sekä arvioida rikkonaisuutta. Seuraavaksi esitellään yleisimpiä kairauksia, joita hyödynnetään pohjavesitutkimuksissa. Esittelyn tarkoituksena on auttaa suunnittelijaa valitsemaan oikeat pohjatutkimusmenetelmät kohteeseensa.

3.8.1 CPTU-kairaus

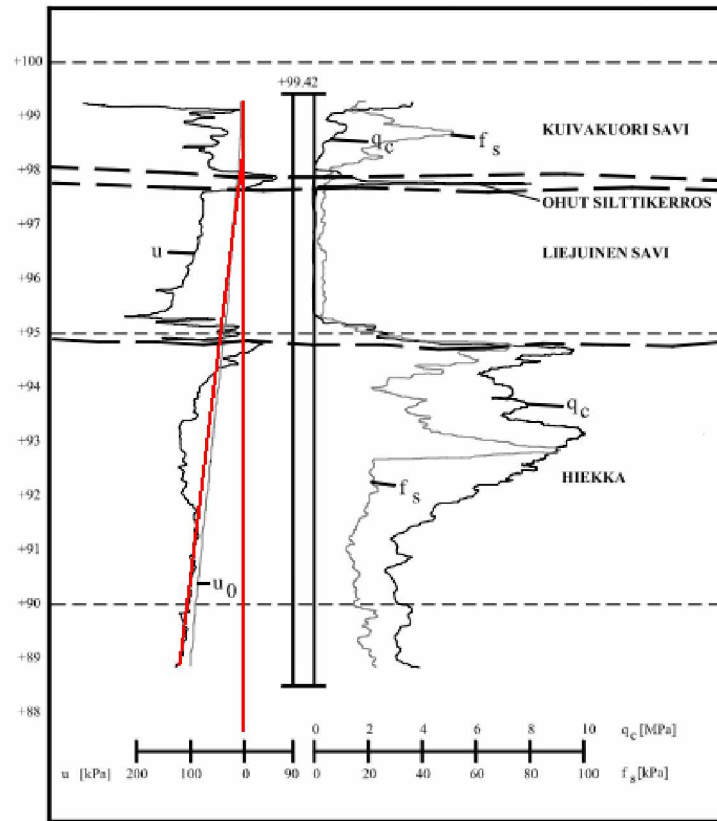
CPTU-kairausta voidaan käyttää pohjavesitilanteen tutkimiseen. Sillä voidaan arvioida maakerrosrakennetta, kerrosten lujuus- ja vedenläpäisevyysominaisuuksia, huokosvedenpainetta sekä kerrosten konsolidaatiotilaa ja vaakasuuntaista konsolidatiokerrointa. CPTU-kairaus soveltuu koheesiomaalajeihin sekä löyhiin ja kivettämiin kitkamaalajeihin. (Tielaitoksen selvityksiä 28/1998)

CPTU-kairauksen suorittamisessa, vettä läpäisevien kerrosten paikallistamisessa ja maakerrosten vedenläpäisevyysominaisuuksien arvioinnissa noudatetaan seuraavia julkaisuja:

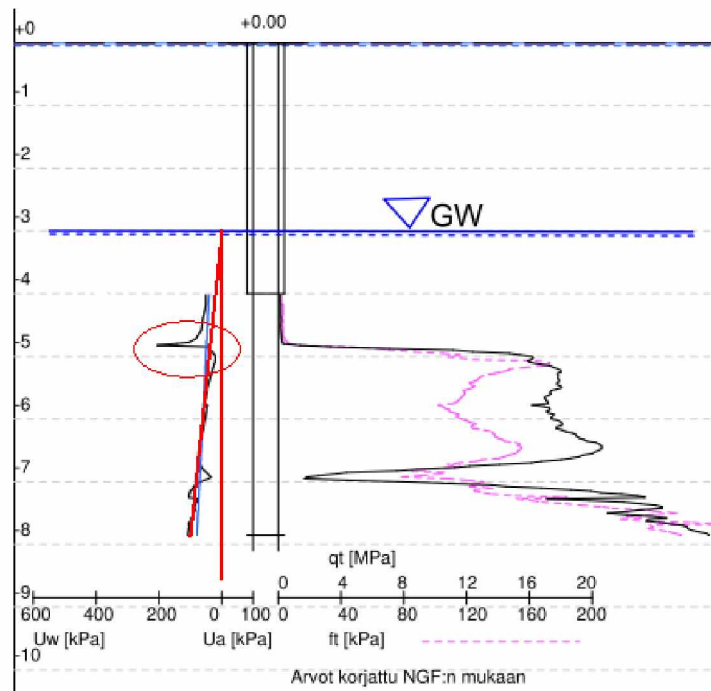
- SFS-käsikirja 179-3; Geotekninen tutkimus ja koestus. Osa 3, Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.
- Kairausopas VI, CPTU/puristinkairaus, Puristin-heijarikairaus, Suomen geoteknillinen yhdistys ry (2001)
- CPTU-kairaus, Tien pohja- ja päällysrakenteet tutkimusohjelma 1994–2001, Menetelmäkuvaus TPPT 11
- Läpäisevän kerroksen paikallistaminen painumalaskennan tarpeisiin, Tien pohja- ja päällysrakenteet tutkimusohjelma 1994–2001, Menetelmäkuvaus TPPT 12.

Kuvassa 3 on esitetty esimerkki CPTU-kairausdiagrammista ja sen tulkinnasta. CPTU-kairauksella on mahdollista havaita savessa olevat ohuet vettä johtavat kerrokset ja huokosvedenpaineen mahdollisesti useat eri tasot. Kairauksella voidaan myös havaita kitkamaassa olevat hienorakeiset kerrokset (kuva 4). Kitkamaassa huokospainekärki mittaa hydrostaattista painetta, jonka paineviiva alkaa pohjavedenpinnasta. Tällä tavoin voidaan vapaassa akviferissa arvioida myös pohjavedenpintaa, ellei sitä ole mitattu (kuvat 3 ja 4).

CPTU-kairauksen aikana voidaan tehdä relaksaatiokoe, jossa kairankärki pysäytetään tutkittavaan maakerrokseen ja seurataan huokospaineen alenemista. Tarkastelemalla huokospaineen alenemista ajan suhteen voidaan laskea ko. kerroksen vedenjohtavuus. Lopulta huokospaine tasaantuu maakerroksessa vallitsevaan staattiseen hydrostaattiseen paineeseen. Näin voidaan saada varmistusta maan vedenjohtavuudesta, jos esimerkiksi pelätään kaivannon pohjannousua.



Kuva 2. Esimerkki CPTU-kairausdiagrammin tulkinnasta (Kairausopas VI, 2001). Kuvassa olevat merkinnät: u on kairauksen aikana mitattu huokospaine, u_0 on maassa vallitseva huokospaine, q_c kärkivastus ja f_s vaippakitka.



Kuva 3. CPTU-kairaus imeytysaltaan kohdalta (Vantaan kaupunki, Kuntatekniikan keskus, 2009). Kuvassa oikealla puolella olevat käyrät kuvaavat kairauksen kärkivastuksen (q_t) ja vaippakitkan (f_t) muutoksia. Kuvassa vasemmalla puolella olevat käyrät kuvaavat maassa vallitsevaa huokospainetta (U_a) ja kairauksen aikana rekisteröitynyttä huokospainetta (U_w).

3.8.2 Porakonekairaus

Kallioperää voidaan tutkia porakonekairauksella. Sen avulla pystytään määrittämään kallionpinnan sijainti ja arvioimaan kallion laatua. Kokeneet kairajat pystyvät arvioimaan myös maakerrosten rajoja ja maalajeja, suurten irtokivien sijaintia, pohjaveden pintaa, pintakallion rikkonaisuutta, kallion rikkonaisuusvyöhykkeitä, ruhjeita sekä kallion lujuutta. Kaikki nämä havainnot ovat tärkeitä kohteen pohjavesitilanteen hahmottamiseksi ja ne tulee kirjata ylös. Kallion laatua pystytään arvioimaan esimerkiksi poran tunkeutumisnopeuden avulla ja tarkkailemalla, läpäistäänkö vettä johtavia kallioruhjeita jatkettaessa kairausta kallioon. Ruhjeen veden täyteisyyttä voi havainnoida esimerkiksi veden- tai ilmanpaineen muutoksista. Ruhjeessa olevaa kalliopohjavettä ja sen antoisuutta voi karkeasti arvioida puhaltamalla kairauksen yhteydessä paineilmaa reikään ja havainnoida vedentulon voimakkuutta. Porakonekairalla voidaan tarvittaessa ottaa näyte maaperästä tai kallioista. Porauksen aikana tulee myös seurata mahdollisia yhteyksiä viereisiin kairareikiin.

Porakonekairauksen suorittamisessa ja tulkinnessa noudatetaan seuraavaa julkaisua:

- Kairausopas V, Porakonekairaus, Suomen geoteknillinen yhdistys ry.

Kallioperän eheyttä voidaan myös tutkia seuraavilla menetelmillä:

- vesimenekikokeella
- kallioreiän videokuvauksella.

3.8.3 Muut kairaukset

Muita aiemmissa pohjatutkimuksissa yleisesti käytettyjä kairauksia, joihin perustuu mm. alustava maakerrosrakenne ja joiden avulla voidaan arvioida esim. maakerroksen tiiveyttä ja kivisyyttä, ovat

- puristin-heijarikairaus ja heijarikairaus
- tärykairaus
- lyöntikairaus
- paineilmakairaus.

3.9 Pohjavedenpinnan tutkiminen

Pohjavedenpinta on Suomessa keskimäärin 2...4 metrin syvyydellä maanpinnasta ja se seuraa yleensä loivasti maanpinnan muotoa (Airaksinen, 1978). Pohjavedenpinta on korkeimmillaan yleensä lumen sulamisen aikana keväällä ja laskee kesällä haihtumisen takia, kunnes on alimmillaan myöhäissyksyllä.

Alueen pohjavedenpinnan korkeutta mitataan pohjaveden havaintoputkista. Havaintoputket ovat yleensä metalli- tai muoviputkia, joiden alapää muodostuu putken siivälosasta. Muoviputket ovat nykyään yleisempiä kuin metalliputket, sillä ne soveltuvat sekä pohjavedenpinnan tason mittaamiseen, pohjavesinäytteiden ottamiseen että jatkuvatoimisten mittalaitteiden asennukseen. Ruostuvista metalliputkista ei saa ottaa vesinäytteitä, sillä putkista saattaa liueta epäpuhtauksia näytteisiin. Mikäli on syytä varautua vesinäytteiden ottamiseen putkesta, tulee havaintoputken sisähal-

kaisijan olla vähintään 52 mm (Rintala & Suokko, 2008). Kalliopohjaveden korkeustasoa mitataan samalla tavalla kuin maaperässä havaintoputkista, joko manuaalisesti mitaten tai jatkuvana mittauksena automaattimittarilla.

Muilla pohjatutkimuksilla hankittujen tietojen perusteella harkitaan, mihin pohjaveden havaintoputkia kannattaa sijoittaa. Pohjavesiputket tulee sijoittaa mahdollisuuksien mukaan siten, etteivät ne tuhoudu rakennustöiden aikana ja myös niiden helppo mittaaminen tulee ottaa huomioon. Putkien siiviläosa tulee sijoittaa maaperän parhaiten vettä läpäisevään kerrokseen. Pintaveden pääsy havaintoputkiin ja koekaivoihin on estettävä. Havaintoputken yläpää tulee sijoittaa tarpeeksi korkealle, jotta ylivuotoa putkesta ei pääse tapahtumaan, mikäli alueella on arteesista pohjavettä. Putkien toimivuus tulee testata välittömästi asennuksen jälkeen.

Ensimmäiset havaintoputkesta tehdyt mittaukset ovat monesti harhaanjohtavia, jos ne tehdään liian nopeasti putken asentamisen jälkeen. Vedenpinnan palaaminen alkuperäiseen tasoon pohjavesiputken asentamisen jälkeen vaatii tietyn ajan, joten pohjavedenpinnan mittaukset saa aloittaa vasta tasaantumisen jälkeen (aikaisintaan yhden vuorokauden jälkeen putken asentamisesta). Mikäli halutaan nopeasti ainakin hetkellisesti oikea mittautulos, voidaan käyttää huokospainemittausta pohjavesiputken asemasta (Tielaitoksen selvityksiä 1/1999).

Varsinaisten pohjavesimittausten laajuus määräytyy suunnitteluvaiheen, alueen pohjasuhteiden, rakennettavan alikulun ja ympäristön perusteella. Havaintoputkia tulee lisätä myöhemmin rakennusvaiheessa mahdollisesti havaittuihin uusiin riskikohteisiin. Lyhytaikaisena havaintoputkena käytetään yleensä alaosaan rei'itettyjä tai uritettuja teräsputkia. Nämä putket toimivat yleensä luotettavasti muutaman kuukauden tai korkeintaan vuoden ajan. Pitkäaikaisina havaintoputkina on käytetty yleensä suodattimilla varustettuja ja työputkea käyttäen asennettuja muoviputkia, joiden suodattimena on suodatinhiekkalla ympäröity siivilä. Putket tulee pitää toimintakuntoisina tietyin puhdistus- ja huoltotoimenpitein.

Kun pohjarakennustyöt tehdään rakennetussa ympäristössä olosuhteissa, joissa pohjavesiolosuhteiden muutoksista voi syntyä huomattavaa haittaa, on luotettavien havaintojen saamiseksi käytettävä jo pohjatutkimusvaiheessa pitkäaikaisia havaintoputkia. Näitä putkia on käytettävä myös silloin, kun maaperä sisältää hienoja maaleja, kuten savea tai silttimoreenia. (Kairausopas IV, 1987)

Pohjavesiputkien sijoittelussa ja asentamisessa noudatetaan SFS-EN 1997-2; Eurokoodi 7: Geotekninen suunnittelu. Osa 2: Pohjatutkimus ja koestus, ja SFS-käsikirja 179-3; Geotekninen tutkimus ja koestus. Osa 3, Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. Yleisimpien käytettävien havaintoputkien materiaalista, mitoista, sijainnista ja asennuksesta löytyy tietoa julkaisussa Pohjavesinäytteenotto, Nykytila ja kehitystarpeet, Suomen ympäristö 48/2008.

3.10 Hydrauliset ominaisuudet

3.10.1 Slug-testi

Pohjaveden havaintoputkessa tehtävällä slug-testillä saadaan arvio keskimääräisestä vaakasuuntaisesta vedenjohtavuudesta, vedenjohtokyvystä ja mahdollisesti varastokertoimesta pienellä alueella havaintoputken siivilän (tai kallioreiän) ympärillä. Slug-

testissä aiheutetaan hetkellinen ja nopea vedenpinnan muutos pohjavesiputkessa tai kallioreiässä, joka on hydraulisessa yhteydessä ympäröivään maa- tai kalliooperään. Vedenpinnan palautumista normaalitasoonsa seurataan putkeen tai reikään asennetulla jatkuvatoimisella vedenpainemittarilla sekä usein myös manuaalisesti (SYKE, 2010b).

Slug-kokeen suunnittelua, suorittamista ja tulosten analysointia on käsitelty laajasti kirjallisuudessa. Tässä on esitetty yleisiä periaatteita. Yksityiskohtaisempaa tietoa ja ohjeistusta on saatavissa esimerkiksi lähdekirjoista Kruseman ja de Ridder (1994), Fetter (2001) ja Brassington (2007).

Slug-testissä nopea vedenpinnan muutos voidaan aiheuttaa eri tavoin, esim. pumpaamalla vettä pois tai lisäämällä vettä pohjavesiputkeen, pudottamalla putkeen tai nostamalla putkesta tietyn tilavuuden omaava lieriökappale (tanko) tai käyttämällä vedellä täytettävää noudinta.

Bailer-menetelmässä käytetään noudinta, joka täyttyy vedellä sitä laskettaessa (Pullinen, 2010). Vedellä täyttynyttä noudinta pois nostettaessa vedenpinta laskee putkessa noutimen tilavuuden mukaisesti. Tämä menetelmä soveltuu paremmin kallioreikiin johtuen kalliooperän pienestä vedenjohtavuudesta (Pullinen, 2010). Slug-testi kannattaa suorittaa vettä syöttämällä tai poistamalla alueilla, joilla vedenpinta on matalalla ja puhdasta vettä on saatavilla. Alueille, joille on vaikeaa tuoda puhdasta vettä, pois pumpattavan veden käsittely on vaikeaa tai pohjavedenpinta on syvällä, voi slug-tankomenetelmä olla kannattavampi menetelmä kuin veden syöttäminen tai poistaminen (Engineering Geology Field Manual, 2001).

Ennen slug-testin aloittamista tulee selvittää pohjavesiputken tai kaivon, jossa testi tehdään, säde sekä siiviläosan säde ja pituus. Testin suunnittelua varten maakerrosrakenteen tulee olla selvillä siiviläosan sijoittamiseksi tutkittavan kerroksen tasolle. Kokeessa tulee käyttää puhdasta vettä. Likainen vesi, jossa on suspendoitunutta kiintoainesta, voi tukkia putken siivilän haitaten tai pilaten testituloksen. Yleensä vedenpintaa poikkeutetaan testattavassa putkessa noin 0,1–1 m (Powers et al. 2007; Kruseman & de Ridder, 1994). Vedenpinta ei saisi nousta pohjavesiputkessa yli metrin. (Brassington, 2007; Engineering Geology Field Manual, 2001).

Ennen testin aloittamista mitataan vedenpinta pohjavesiputkesta (tai kaivosta) lähtötilanteen selvittämiseksi. Testin aikana vedenpinnan mittaukset tulee aloittaa heti, kun vedenpinnan poikkeuttaminen lopetetaan. Mittaukset suoritetaan tietyin aikavälein vedenpinnan palautuessa takaisin kohti alkuperäistä tasoaan. Mittauksia tulee tehdä kokeen alussa tiheämmin. Tarvittava mittausväli riippuu mm. kohteen maaperästä. Hyvin vettä läpäisevissä maissa vedenpinta putkessa voi palautua alkuperäiseen tasoonsa alle 30 sekunnissa. Tällaisissa tapauksissa tulee käyttää jatkuvatoimista, automaattista painemittaria, joka mittaa ja tallentaa tietyin aikavälein vedenpinnan korkeuden putkessa. Slug-testin aikana tapahtuvien nopeiden vedenpinnan muutosten mittausvirheet ovat usein toistuva ongelma.

Huonosti vettä läpäisevissä savimaalajeissa vedenpinnan palautuminen alkuperäiseen tasoonsa on hidasta ja voi kestää tunneista aina kuukausiin. Tällöin riittää, että vedenpintaa mitataan manuaalisella painemittarilla tai tavallisella vedenpinnan korkeusmittarilla. Vedenpinnan mittaukset voidaan lopettaa, kun vedenpinnan taso put-

kessa on palautunut riittävästi tai alkuperäiseen tasoonsa. (Brassington, 2007; Fetter, 2001; Powers et al. 2007).

Slug-testin tuloksia voidaan tarkastella usealla eri menetelmällä, joista tunnetuimpia ovat Hvorslevin ja Bouwer-Ricen menetelmä. Useat näistä laskentamenetelmistä ovat graafisia, joita varten piirretään käyrä vedenpinnan muutoksesta (alenemisesta) ajan suhteen. Näihin laskentamenetelmiin pohjautuen on kehitetty erinäisiä tietokoneohjelmia laskemaan akviferin ominaiset suureet slug-testin tuloksista. Oikean laskentamenetelmän valintaa varten täytyy tietää mm. onko akviferi paineellinen vai vapaa ja kuinka syvälle vettä johtavaan kerrokseen testiputken/-kaivon siiviläputki ulottuu. Seuraavassa osuudessa on esitelty yleisesti tunnettu Hvorslevin menetelmän pääpiirteet.

3.10.1.1 Hvorslevin menetelmä

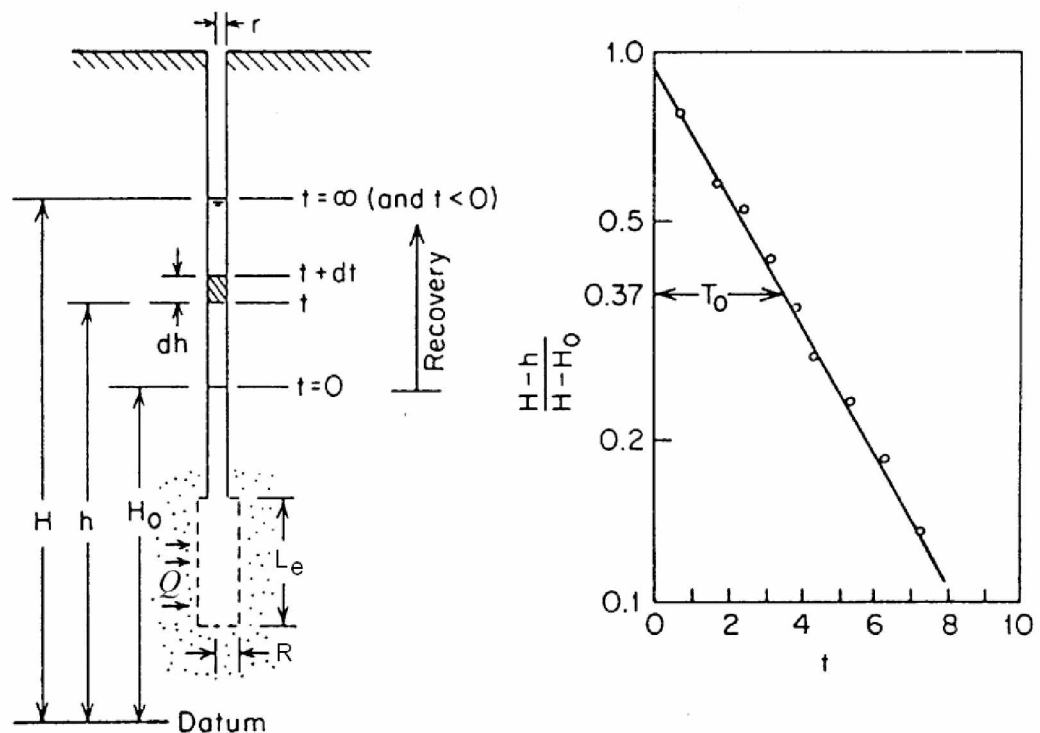
Hvorslevin menetelmä soveltuu sekä paineellisille että vapaille akvifereille, mutta ai-noastaan pohjavedenpinnan alapuolella, ja useille erilaisille kaivo- tai pohjavesiputkien geometrioille. Menetelmä soveltuu myös silloin, kun testikaivo tai -putki ei läpäise kokonaan pohjavesiesiintymän vettä läpäisevää kerrosta. Jos putki on asennettu huonosti vettä läpäisevään maahan, siiviläputken ympärille täytyy asentaa soraa (Fetter, 2001).

Hvorslevin menetelmässä lasketaan pohjavedenpinnan alenema (tai ylenemä) ajan suhteen ($H-h$) ja alenema (ylenemä) testin alussa ($H-H_0$) heti sen jälkeen, kun vettä on poistettu (tai lisätty) pohjavesiputkesta, ks. kuva 5. Näiden muutosten alenemien suhteesta piirretään kuvaaja ajan t suhteen puolilogaritmisella asteikolla. Menetelmässä lasketaan vedenläpäisevyyden arvo ottamalla huomioon pohjavesiputken geometria ja se, minkälaisiin olosuhteisiin putken siiviläosa on asennettu. Vedenläpäisevyyden laskentakaava vaihtelee edellä mainittujen tietojen mukaan. Hvorslevin menetelmän laskentakaavoja eri putken geometrioille on esitetty kirjallisuudessa, esim. Brassington (2007), Powers et al. (2007) ja Engineering Geology Field Manual (2001).

Mikäli pohjavesiputken siiviläosan pituus on vähintään 8 kertaa suurempi kuin siiviläosan säde ($L_e/R > 8$), voidaan vedenläpäisevyydelle k [m/s] käyttää kaavaa (2) (Fetter, 2001).

$$k = \frac{r^2 \ln(L_e/R)}{2L_e T_0} \quad (2)$$

r on	havaintoputken säde [m]
L_e	putken siiviläosan pituus [m]
R	siiviläosan ja sitä mahdollisesti ympäröivän soratäytön säde [m]
T_0	aika, joka kestää vedenpinnan nousta tai laskea 37 % alkuperäisestä vedenpinnan muutoksesta [s].



Kuva 4. Hvorslevin menetelmän periaate ja esimerkkikuvaaja: vedenpinnan korkeuksien suhde ajan t suhteen (Engineering Geology Field Manual, 2001).

3.10.2 Antoisuuspumppaus

Antoisuuspumppauksella voidaan selvittää maakerrosten vedenantoisuus ja pohjaveden kerroksittaiset laatu vaihtelut (Rintala & Suokko, 2008). Lisäksi antoisuuspumppauksen tulosten avulla voidaan määrittää koekaivon siivilän asennustaso, koepumppaukseen käytettävien imuputkien asennustaso sekä akviferia parhaiten edustava koepumppauksen suorituspaikka. Kairausten ja maanäytteiden perusteella otollisimpaan paikkaan asennetaan yleensä metrin mittaisella siiviläosalla varustettu pohjavesi- tai imuputki. (Airaksinen, 1978)

Antoisuuspumppaus on lyhytaikainen pumppaus, jossa pohjavesiputkesta pumpataan vettä eri syvyyksiltä pohjavedenpinnan alapuolisista maakerroksista esim. metrin syvyysvälein. Syvyysvälit voivat olla harvemmassakin. Putki tulee asentaa lyömällä määräsyyvyteen. Putken ollessa määräsyyvydessä pohjavettä pumpataan putkesta imupumpulla. Putken kylkiä myöten ei saa tapahtua pohjaveden ohivirtausta. Pumppausvirtaama (l/min/m) mitataan, tehdään havainnot pumpattavan veden kirkastumisesta ja otetaan tarvittaessa vesinäytteitä eri syvyyksiltä, sillä veden laatu ja antoisuus saattavat vaihdella syvyyden mukaan. Pumppaus lopetetaan, kun pumpattava vesi on kirkastunut ja pumpattava vesimäärä tasaantunut. Pumppauskokeen lisäksi voidaan tehdä myös syöttökoe, jossa putki täytetään vedellä ja mitataan sen jälkeen veden alenemisnopeus. Pohjavesi- tai imuputki lyödään tämän jälkeen esim. 1 m syvemmälle ja pumpataan taas. Näin jatketaan tarpeen mukaan akviferikerrosten läpi. Veden laatu ja antoisuus voivat vaihdella myös lähekkäin sijaitsevilla pohjavesiputkissa. Pumppaus kohdistetaan varsinkin maaperän vettä johtaviin kerroksiin. (Airaksinen, 1978; Suomen vesiyhdistys, 2005).

Mikäli antoisuuspumppauksessa käytetään maanpinnalle sijoitettavaa imupumppua, tulee pumppauspaikaksi valita alava maastonkohta. Pumppauksen onnistumisen edellytyksenä on, että pohjavedenpinta on enintään 5...6 m syvyydellä maanpinnasta. (Suomen vesiyhdistys, 2005).

3.10.3 Koepumppaus

Koepumppauksen avulla saadaan tietoa maaperän alueellisista vedenläpäisevyysarvoista, akviferin vedenjohtokyvystä ja varastokertoimesta. Koepumppauksen avulla voidaan selvittää myös pohjaveden antoisuutta, laatua sekä vedenoton ympäristövaikutuksia. Koepumppaus tulee tehdä, kun akviferin ominaisuuksista ja alikulun kuivatuksen vaikutuksista tarvitaan kattavaa ja tarkempaa tietoa. Pumppaus voidaan tehdä mm. imuputkesta tai putkistosta, pohjaveden havaintoputkesta tai putkikaivosta. Koepumppaus voidaan tehdä pitkäaikaisena tai lyhytaikaisena. Koepumppauksen suunnittelua, tekemistä ja tulosten analysointia on käsitelty laajalti kirjallisuudessa. Tässä esitetään tärkeimpiä yleisperiaatteita. Yksityiskohtaisempaa ohjeistusta ja tietoa ovat esittäneet esimerkiksi Kruseman ja de Ridder (1994), Fetter (2001), Brassington (2007), Suomen vesiyhdistys (2005) ja Airaksinen (1978).

Paras ajankohta koepumppaukselle on keskikesä tai sydäntalvi. Syksyllä pitkät sadejaksot ja keväällä lumen ja roudan sulamisen aiheuttama valuma vaikeuttavat koepumppauksen tulkintaa (Suomen vesiyhdistys, 2005). Ennen varsinaisen koepumppauksen aloittamista tulee tehdä alustavia lyhytaikaisia pohjaveden pumppausmittauksia (antoisuusmittauksia), jotta saadaan selville pumppausmäärien karkea suuruusluokka ja löydetään sopiva paikka varsinaiselle koepumppaukselle. Pumppauspaikan valinnassa käytetään luonnollisesti alueella tehtyjä maasto- ja pohjatutkimuksia.

Koepumppauspaikan ympäristöstä tulee kartoittaa ennen pumppauksen aloittamista kaikki yksityiskaivot, joita voidaan myös käyttää koepumppauksessa pohjavedenpinnan tarkkailuun. Ennen koepumppauksen aloittamista selvitetään myös, ovatko yksityiskaivot käytössä pumppauksen aikana. Koepumppauksien tulosten tulkinnan helpottamiseksi ympäristössä ei saa olla koepumppauksen aikana muita pumpattavia kaivoja käytössä tai niistä tulee pumpata vakiovirtaamalla koko koepumppauksen ajan. Saatua tuloksia on vaikea korjata niin, että muiden lähistöllä olevien pumppujen käynnistäminen ja sammuttaminen ei vaikuttaisi tuloksiin (Fetter, 2001).

Sopivalle koepumppauspaikalle ja sen ympäristöön asennetaan havaintoputkia pohjavedenpinnan vaihtelujen havaitsemiseksi pumppausaikana ja sen jälkeen. Havaintoputkien siivilän tulee sijaita vettä johtavassa kerroksessa, josta koepumppaus suoritetaan. Koepumppausta varten tehtyjen havaintoputkien vähimmäisetäisyys pumppauskaivosta on 5 m, ja yleensä etäisyys vaihtelee noin 10...300 m (Brassington, 2007; Kruseman & de Ridder, 1994). Muutama havaintoputki on hyvä sijoittaa myös pumppauksen vaikutusalueen ulkopuolelle, jotta voidaan mitata akviferin luonnollista pohjavedenpinnan vaihtelua. Näiden putkien tulee olla vähintään useiden satojen metrien päässä pumppauskaivosta. Jos pohjavedenpinnan korkeudet vaihtelevat näissä putkissa koepumppauksen aikana, tulee pumppauksesta aiheutuvaa pohjaveden alenemaa korjata saman verran (Kruseman & de Ridder, 1994). Vedenpinnan taso havaintoputkissa ja kaivoissa tulee kirjata useampia kertoja 1 – 3 viikon aikana ennen koepumppauksen aloitusta. Pumppauksen loputtua jatketaan vedenpinnan mittaamista muutaman päivän ajan sen jälkeen, kun vedenpinta on noussut takaisin alkupe räiseen tasoonsa. Näistä mittauksista saadaan tietoa pohjavedenpinnan lähtötasosta

sekä pohjaveden luontaisesta vaihtelusta, joiden avulla voidaan korjata pumppauksesta aiheutuvaa pohjaveden alenemaa.

Valittuun koepumppauspaikkaan asennetaan pumppauskaivo, jonka on suositeltavaa ulottua avoimena koko vettä läpäisevän kerroksen läpi. Kaivon sekä akviferin tiedot ja mittasuhteet, kuten akviferin paksuus, tulee kirjata koepumppauspöytäkirjaan. Akviferin vettä johtavasta kerroksen materiaalista tulee tehdä kuvaus ja ottaa näytteitä (Fetter, 2001).

Tärkeimmät mittaukset koepumppauksen aikana ovat pumppausvirtaaman mittaaminen ja vedenpinnan korkeuden mittaukset pumppauskaivosta, havaintoputkista ja vaikutusalueen yksityiskaivoista. Koepumppaus tehdään yleensä vakiopumppausvirtaamalla. Tarvittaessa pumppauksessa voidaan käyttää myös muuttuvaa virtaamaa. Pumppausvirtaama voidaan pitää vakiona pumpun paineputkessa olevan venttiilin avulla (Kruseman & de Ridder, 1994). Pumppausvirtaaman mittaukseen käytetään esim. virtaamamittaria, astiamittausta tai säiliötä ja sen reunaan asennettua mittapatoa. Virtaamamittareita käytettäessä ne tulee suojata jäätymiseltä. Astiamittauksessa mitataan tunnetun kokoisen astia täyttymisaika. Astiamittausta voidaan käyttää vain pienillä pumppausvirtaamilla (Fetter, 2001). Pumppausvirtaama mitataan yleensä 2...3 kertaa vuorokaudessa (Airaksinen, 1978). Virtaamaa saattaa olla tarpeen mitata tätä useamminkin, mikäli mittausten avulla pyritään pitämään pumppausvirtaama vakiona. Pumpattu vesi on johdettava riittävän kauas pumppauspaikalta, ettei vesi pääse palaamaan takaisin tutkittavaan pohjavesiesiintymään.

Vedenpinta pumppauskaivossa laskee koepumppauksen alussa nopeasti, kun pumpu on käynnistetty. Koepumppauksen alussa ja pumppauksen päätyttyä pohjavedenpinnan korkeustasoja mitataan tiheimmin. Pumppauksen jatkuessa havaintoja voidaan harventaa ottaen huomioon alkuvaiheen havainnot pohjavesipintojen alenemisnopeudesta. Mittausten havaintoväli riippuu myös pohjavesiesiintymän ominaisuuksista ja havaintoputkien etäisyyksistä pumppauspaikasta. Mitä lähempänä pumppauskaivoa havaintoputki on, sitä tiheämmin pitää mitata. Pohjavedenpinnan korkeuden ohella mittauksissa kirjataan aina mittauksen päivämäärä ja kellonaika. Jos pumppausvirtaamaa muutetaan kokeen aikana, pitää mittauksia aina tehdä tiheämmin virtaamamuutoksen alusta lukien. Koepumppauksen kestätyä useampia päiviä pohjaveden korkeustasoja mitataan noin 1...4 kertaa vuorokaudessa. Veden pumppauksen päätyttyä pohjavedenpinnan palautumista tarkkaillaan mittaamalla vedenpinnat pumppauspaikassa ja havaintoputkissa samalla mittaustiheydellä kuin pumppauksen alussa. Mittaukset voidaan yleensä lopettaa, kun pohjavesi on noussut koepumppausta edeltäneeseen tasoon tai vedenpinta ei enää kohoa (Brassington, 2007; Airaksinen, 1978).

Vedenkorkeushavaintojen kestoa määritettäessä tulee pumppauspaikan välittömässä läheisyydessä olevien putkien mittaustuloksia verrata kauempana oleviin, pitkäikäishavaintoverkkoon kuuluvien vertailuputkien tuloksiin. Taulukoissa 3 ja 4 on esimerkkejä pohjavedenpinnan korkeushavaintojen tiheydestä koepumppauksessa, mitattuina pumppauskaivosta ja havaintoputkista.

Taulukko 3. Esimerkki koepumppauskaivosta mitattavan vedenpinnan korkeushavaintojen mittausväleistä pumppauskokeen aikana (Krusen & de Ridder, 1994).

Aika laskettuna pumppauksen alkamisesta	Havaintoväli
0...5 min	30 s
5...60 min	5 min
60 min...2 h	20 min
2 h...pumppauksen päättymiseen asti	60 min

Taulukko 4. Esimerkki havaintoputkista mitattavan vedenpinnan korkeushavaintojen mittausväleistä pumppauskokeen aikana (Krusen & de Ridder, 1994).

Aika laskettuna pumppauksen alkamisesta	Havaintoväli
0...2 min	noin 10 s
2...5 min	30 s
5...15 min	1 min
15...50 min	5 min
50...100 min	10 min
100 min...5 h	30 min
5...48 h	60 min
48 h...6 d	3 kertaa päivässä
6 d...pumppauksen päättymiseen asti	kerran päivässä

Pitkäaikaisen koepumppauksen tarvittava kesto aika riippuu mm. pumppauskaivon sijainnista ja pohjavesiesiintymän ominaisuuksista. Koepumppaus lopetetaan, kun on saavutettu virtauksen tasapainotilanne. Tällöin käytetyllä pumppausteholla pohjavedenpinta ei enää laske pumppauskaivossa. Pumpun tehoa säätämällä voidaan etsiä tilanne, jossa saavutetaan näennäinen tasapaino. Tavallisesti koepumppaus kestää 1...3 kk, jona aikana vedenoton vaikutusalue laajenee (Suomen vesiyhdistys, 2005 ja Airaksinen, 1978).

Mikäli pohjavedenpinnan alenemat ovat suuria ensimmäisten vuorokausien aikana pumppauksen alussa ja pohjavedenpinta nousee hitaasti pumppauksen päätyttyä, pohjavesiesiintymän vedenjohtokyky on pieni ja/tai esiintymä saattaa olla pienialainen. Jos taas alenemat ovat vähäisiä pumppauksen alussa ja pohjavedenpinnan nousu takaisin on nopea pumppauksen päätyttyä, esiintymä on hyvin vettä johtava ja laaja. (Airaksinen, 1978)

Lyhytaikainen koepumppaus kestää yleensä 1...3 vuorokautta. Mikäli käytössä ei ole jatkuvatoimista, tallentavaa vedenkorkeusmittaria, havaintoväli saa olla enintään 1/10 ajasta, joka on kulloinkin kulunut pumpun käynnistämisestä (Airaksinen, 1978). Koepumppaus voidaan toteuttaa maksimituotolla, jolloin pumppauksen ulottuma muodostuu ajan myötä suurimmaksi.

Koepumppauksen tuloksien analysointia varten on kehitetty erilaisia laskentamenetelmiä, joista laajalti käytetään esim. Theisin ja Cooper-Jacobin menetelmiä. Sopivimpien laskentamenetelmien valinnassa ja niitä käytettäessä on huomioitava niiden

lähtöoletukset. Menetelmiä on sekä paineellisille että vapaille akvifereille erilaisiin virtaustilanteisiin. Näihin ja muihin menetelmiin pohjautuen on kehitetty erinäisiä tietokoneohjelmia laskemaan akviferille ominaiset suureet.

3.10.4 Pohjaveden virtauksen muita maastomittausmenetelmiä

Muita pohjaveden virtauksen maastomittausmenetelmiä ovat:

- kairanreikämenetelmä
- imeytyskokeet
- merkkiainekokeet.

Näistä menetelmistä löytyy lisää runsaasti tietoa kirjallisuudesta. Esimerkiksi lisää hyödyllistä tietoa merkkiainekokeen suunnittelusta ja eri merkkiaineista löytyy mm. Suomen vesiyhdistyksen julkaisusta Pohjavesitutkimusopas, Käytännön ohjeita (2005).

3.11 Ympäristön seuranta ja katselmukset

Ympäristön seurantamittauksissa mitataan pohjavedenpinnan korkeusasemaa havaintoputkissa ja kaivoissa, pumpattavia vesimääriä sekä lähistön rakenteiden ja rakennusten korkeusasemaa painumisen varalta. Mittaukset tulee aloittaa jo suunnitteluvaiheessa ennen rakennustöiden ja pohjaveden alentamisen aloittamista. Seurantamittauksia on tehtävä siis ennen rakentamistöiden aloittamista, niiden aikana sekä niiden jälkeen tarvittavan ajan. Seurantamittauksista tulee laatia suunnitelma, jossa on mittausuunnitelman ohella ohjeet tuloksien käsittelystä ja tulkinnasta.

Alikulkujen suunnittelua varten tarvitaan pohjavedenpinnan korkeustiedot, jotta voidaan määrittää tarvittava kuivatustarve. Pohjavedenpinnan seuranta tulee aloittaa jo kohteen yleissuunnitteluvaiheessa ja joka tapauksessa riittävän varhaisessa vaiheessa, jotta pohjavedenpinnan luontainen vaihtelu saadaan selvitettyä mahdollisimman pitkältä aikaväliltä. Pohjavedenpinnan luontainen vaihtelu voi olla useita metrejä, joten lähtötilanteen selvittämiseksi tulisi olla käytettävissä havaintosarja vähintään vuoden ajalta. Luonnollisen vaihtelun selvittämiseksi on havaintoja yleensä suoritettava 1...2 kertaa kuukaudessa (Kairausopas IV, 1987).

Rakentamistöiden aikana pohjaveden alenemisen seuraaminen voi vaatia mittauksia kerran viikossa...tarvittaessa päivittäin tai joskus tätäkin useammin. Mikäli alikulkua tehtäessä alennetaan pohjavedenpintaa työnaikaisesti tai pysyvästi, sen tarkkailua jatketaan, kunnes pohjavedenpinnan voidaan katsoa palautuneen entiselleen tai suunniteltuun tasoon. Kun alueen luonnollinen pohjavedenpinnan vaihtelu tiedetään, seurantamittauksen avulla saadaan selville myös alikulun rakentamisesta aiheutunut pohjavedenpinnan alentuminen. Vedenkorkeushavaintoja suositellaan jatkettavaksi niin pitkään, että niiden ja lähistöllä olevien pitkäaikaishavaintoverkkoon kuuluvien vertailuputkien avulla voidaan selvittää pohjavedenpinnan pysyvän alentumisen suuruus.

Alikulkuleikkauksen lähistön rakennusten ja rakenteiden painumia tulee mitata osana ympäristön seurantamittauksia painumaherkillä alueilla, varsinkin mikäli rakenteet ja rakennukset ovat maanvaraisia. Painumatarkkailu tulee aloittaa hyvissä ajoin ennen rakennustöiden aloittamista, jotta alikulun mahdolliset painumavaikutukset raken-

nuksiin ja rakenteisiin saadaan luotettavasti selvitettyä. Painumia voidaan mitata esim. tarkkavaaituskoneella rakennusten perustuksiin asennetuista painumapulteista. Painumapulteista mitattuja korkoja verrataan tunnettuun referenssikorkoon, minkä perusteella lasketaan rakenteen painuma.

Arvioidun vaikutusalueen rakennuksissa tulee myös suorittaa katselmus, jossa selvitetään rakennusten kunto ja mahdolliset vauriot ennen rakentamistöiden ja pohjaveden alentamisen aloittamista. Katselmuksesta tehdään pöytäkirja, johon merkitään tehdyt havainnot ja jonka liitteeksi otetaan valokuvia. Samoin tulee myös kartoittaa tulevan alikulun lähistön rakennusten ja rakenteiden perustamistavat mahdollisten puuperustusten takia. Lisäksi tulee selvittää alimman pohjavedenpinnan taso, mikäli kartoitettavalla vaikutusalueella on puuperustusrakenteita. Alimman pohjavedenpinnan on pysyttävä vähintään 0,5 m puuperustusten ylimmän tason yläpuolella (Suomen Vesiyhdistys, 2005), mitä tulee tarkkailla pohjavedenpinnan seurantamittauksissa.

4 Pohjaveden alennuksen suunnittelu

4.1 Työnaikainen pohjaveden alennustarve

Pohjaveden hallinta ja alentaminen eri keinoin on kannattavaa, koska kaivannon tekeminen kuivatyönä on yleensä teknisesti yksinkertaisempaa ja kustannuksiltaan edullisempaa kuin vedenalainen kaivu (RIL 166, 1986). Kaivannon kuivanapidosta aiheutuu pohjaveden alenemista kaivannon lähiympäristössä. Tämän vuoksi ennen kaivantojen tekemistä tulee selvittää pohjatutkimuksilla maaperän hydrauliset ominaisuudet ja pohjavedenpinnan alenemisen vaikutukset maakerroksiin, joihin kuivatus kohdistuu (RIL 95, 1974).

Kaikkien alikulun työnaikaista pohjaveden alennustarvetta koskevan suunnittelun ja päätösten tulee pohjautua geoteknisiin ja hydrogeologisiin selvityksiin tai tutkimuksiin sekä tulevan alikulun perustietoihin. Alentamisen suunnittelussa tulee ottaa huomioon alikulun perustamistavat ja työmenetelmät. Esimerkiksi kallion louhiminen voi tuhota kalliokynnyksen, joka toimii paikallisena pohjavedenjakajana.

Rakennuskaivantoon voi virrata hule- ja pintavesiä sekä maakerrosten läpi orsi- tai pohjavettä. Pintavesien pääsy kaivantoon tulee pyrkiä estämään niskaojituksella ja tarvittaessa erilaisilla pato- ja suojarakenteilla, tai vedet ohjataan hallitusti kaivannon pohjan pumppukuoppiin.

Työnaikaisen pohjaveden alennuksen yleissääntönä voidaan pitää, että pohjavesi tulee alentaa 0,5... 1 m kaivutason alapuolelle. Pohjavesialueella pohjaveden alentaminen tai muu vesien pois johtaminen, joka voi vaikuttaa vedenottamon tai yksityiskaivojen vedenantaisuuteen, voi edellyttää aluehallintoviraston (AVIn) lupaa pohjaveden muuttamiseen. Lupahakemus on laitettava vireille viimeistään rakennussuunnitelman aikana (Liikennevirasto, 2010b).

4.2 Käyttötilan aikainen pohjaveden alennustarve

Mikäli pohjavettä alennetaan pysyvästi, on sen vaikutusalueen laajuus selvitettävä koepumppauksen ja muiden ennakkotutkimusten avulla. Suunnittelijan kuuluu laatia arvio pysyvän pohjaveden alentamisen vaikutuksista sekä suunnitelma haittojen vähentämiseksi ja korvaamiseksi. Mikäli alikulun rakentaminen aiheuttaa pysyvää pohjaveden alenemista, on selvitettävä ympäristöviranomaisten kanssa, onko tämä sallittavaa vai pitääkö pohjaveden pysyvä aleneminen estää tai rajata rakenteellisesti. Viranomaisten kanssa on myös selvitettävä pohjaveden pilaantumisriski ja pilaantumisen estäminen rakenteellisesti.

Alikulkuhankkeen ja kuivatustoimenpiteiden vaikutusten laajuus sekä pohjaveden alentamisen seuraukset määrittelevät, tarvitaanko vesilain mukaiset luvat pohjaveden pumppaamiseen maaperästä. Suomen vesilaissa todetaan, että pohjaveden ottamiselle, kun otettava määrä on yli 250 m³/vrk samoin kuin toimenpide, jonka seurauksena pohjavesiesiintymästä poistuu muutoin kuin tilapäisesti pohjavettä vähintään 250

m³/vrk, on haettava lupa ympäristöviranomaisilta (VL 27.5.2011/587, luku 3, 3 §). Nykyisen käytännön mukaan Elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus (ELY-keskus) valvoo ja ottaa kantaa ympäristöluvan tarpeeseen kohdealueellaan sijaitseviin hankkeisiin, mutta Aluehallintovirasto (AVI) myöntää kohdealueeseensa kuuluvien hankkeiden ympäristöluvat. Ympäristöluvat on hankittava etukäteen (Luntinen, 2010).

Alin sallittava pysyvä pohjavedenpinta määritellään ympäristövaikutusten mukaan. Yleensä pohjavettä voidaan alentaa jonkin verran ilman merkittäviä ympäristöhaittoja, jolloin osittainen, hallittu pohjavedenalennus voi mahdollistaa pohjavedenpinnan alapuolelle rakennettavat kaukaloratkaisut. Tällöin suunnitelmissa pitää huolehtia, että mitoittavaa pohjavedenpinnan tasoa vastaavaa nostetta vastaan on riittävä vastapaino ja että vedenpaine kaukalorakenteen alla ei pääse nousemaan mitoitusarvoja korkeammalle. Kaukalon tiivisrakenteen alapuolelle on suunniteltava vedenpaineen hallintaa varten salaojitus.

4.3 Mallintaminen

4.3.1 Suotovirtausmallinnus

Suotovirtaus on pohjaveden hidasta virtausta, joka tapahtuu huokoisessa väliaineessa kuten maaperässä tai rakoilleessa kalliossa. Suotovirtausmallinnusta tarvitaan pohjaveden virtauksen, maa- tai kallioleikkaukseen tulevan vesimäärän, leikkauksen toteutettavuuden, kuivatustavan ja ympäristövaikutusten selvittämiseksi. Virtausmallilla voidaan arvioida eri toimenpiteiden vaikutuksia, vertailla erilaisia rakenteita ja sen tulosten perusteella voidaan myös ohjata tutkimuksia oleellisiin paikkoihin.

Suotovirtauksen mallinnus perustuu Darcyn lakiin (kaava 3). Darcyn laki kuvaa veden laminaarista virtausta maaperässä.

$$v = k \cdot i \quad (3)$$

v on	veden virtausnopeus [m/s]
k	vedenläpäisevyyskerroin [m/s]
i	hydraulinen gradientti

Suotovirtausmalli on yksinkertaistettu kuvaus olemassa olevasta tilanteesta. Keskeiset mallinnettavat ominaisuudet tulee kuitenkin ottaa huomioon. Tämä edellyttää maakerrosrakenteen ja sen geohydrologisten ominaisuuksien kartoittamista. Mallinnus aloitetaan aina selvitettävän asian määrittelyllä ja lähtötietojen kokoamisella. Mallinnuksessa tarvittavia lähtötietoja ovat mm. maakerrosten vedenläpäisevyys, varastokerroin, maanpinnan ja maakerrosten topografia. Mitä monimutkaisempi ja laajajalaisempi malli tehdään, sitä enemmän tarvitaan lähtötietoja. Suotovirtausmallinnuksessa keskeisiä lähtötietoja ovat kunkin virtaustapauksen reunaehdot.

Suotovirtauslaskelmien avulla voidaan arvioida pohjaveden alentamisesta aiheutuvia alikulkuleikkauksesta pumpattavia vesimääriä ja pohjavedenpinnan korkeustasoa ympäristössä. Laskelmien tuloksista arvioidaan, joudutaanko hakemaan vesilain mukaista lupaa, joka tarvitaan, jos pumpattavan pohjaveden määrä ylittää 250 m³/vrk.

Suotovirtausmallinnuksesta saadaan yhtenä tulosteena virtausverkosto, jolla kuvataan pohjaveden virtausta graafisesti. Virtausverkoston muodostavat virtaus- ja ekvi-

$$i = \frac{\Delta H}{\Delta L} \quad (4)$$

1. Alin virtausviiva on vettä läpäisemättömän kerroksen reuna.
2. Ylin virtausviiva eli suotoviiva on pohjaveden pinta maapohjassa.
3. Ekvipotentialiivien alkukohta
4. Ekvipotentialiivien loppukohta.

Läpäisemätön pohjamaa

Kuva 5. Virtausverkosto maaluiskassa (Liikennevirasto, 2010a).

Pohjavettä alennettaessa on arvioitava hienorakeisten maakerrosten painumat kohteeseen ympäristössä painumalaskelmilla, joissa tarvittava pohjavedenpinnan alenema ja sen vaikutusalue saadaan esim. suotovirtauslaskelmista. Ympäristön painumariskiä ja painumien suuruusluokkaa voidaan alustavasti arvioida esimerkiksi vesipitoisuuden perusteella. Mikäli alustavilla tarkasteluilla ympäristön painumat osoittautuvat merkittäviksi joko alikulun rakentamisen aikana tai käyttövaiheessa, tulee tehdä tarkempi painumien laskentatarkastelu. Nämä painumalaskelmat tehdään ödometrikoista saatujen painumaparametrien, konsolidaatiotilan ja kuormitushistorian pohjalta.

4.4 Alennustekniikat

Pohjavettä voidaan alentaa ennakkoon ja työnaikaisesti seuraavilla menetelmillä:

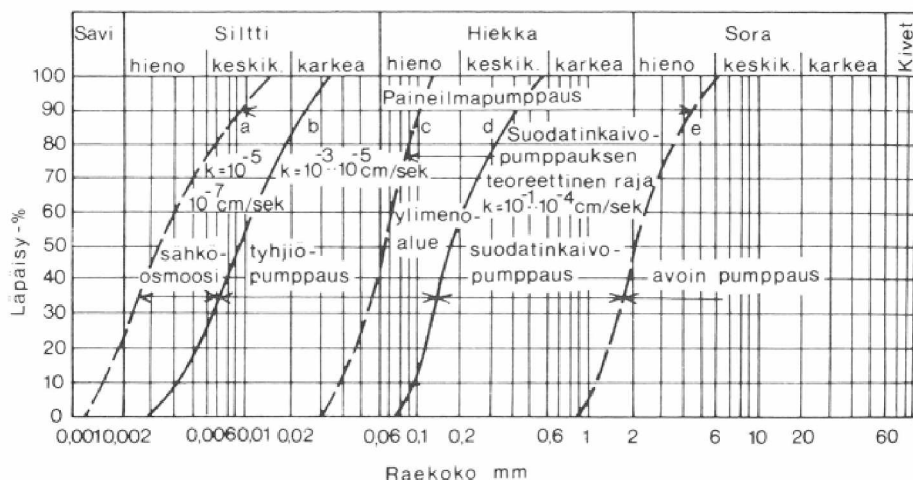
- pumppaamalla suoraan kaivannosta ja pumppukuopista
- pumppaamalla suodatinputki- ja syväkaivoista
- tyhjiömenetelmällä
- sähköosmoosimenetelmällä.

Pohjaveden alentamismenetelmiä on kuvattu mm. seuraavissa julkaisuissa: RIL 95 Pohjarakennus (1974), RIL 166 Pohjarakenteet (1986) ja RIL 194–1992 Putkikaivanto-ohje (1992).

Käytettävän menetelmän valinta riippuu maaperä- ja kallio-olosuhteista, kuten maaperän rakeisuudesta ja vedenläpäisevyydestä, pohjavesiolosuhteista sekä hankkeen tavoitteista, kuten kaivussyvyydestä ja kuivatuksen laajuudesta (RIL 207–2009). Myös pohjavedenpintojen tasot, joiden välillä alentaminen tehdään, vaikuttavat alennusmenetelmän valintaan. Kuvassa 7 esitetään eri menetelmien käyttöalueet maakerrosten rakeisuuden perusteella. Karkearakeisissa maakerroksissa riittää painovoiman aiheuttama virtaus pumppauskuoppiin tai -kaivoihin. Mitä hienorakeisempaa maakerostuma on, sitä enemmän tarvitaan lisäpainetta veden virtauksen nopeuttamiseksi.

Kaikilla pohjaveden alennustekniikoilla tulee ottaa seuraavat asiat huomioon (RIL 95, 1974):

- Alennettua pohjavedenpintaa tulee seurata siten, että vältetään äkillisiltä vaihteluilta, jotka voivat aiheuttaa luiskasortumia.
- Pumppauspisteiden ympärille tarvitaan suodattimet, jotka estävät maaineksen kulkeutumisen pumpattavan veden mukana.
- Pumppaamisen jatkuvuuden tulee olla turvattu siten, että työmaalla on varapumppuja.
- Pohjavettä ei alenneta tarpeettoman syvälle.



Kuva 6. Pohjaveden alennusmenetelmien käyttöalueet (RIL 95, 1974). Huom. kuvan yksikön "cm/sek" sijasta nykyään käytetään yksikköä "m/s" (esim. 10^{-3} cm/sek = 10^{-5} m/s).

4.5 Vaikutusten rajoittaminen

Pohjaveden alennuksen ympäristövaikutuksia voidaan rajoittaa seuraavilla menetelmillä:

- pohjaveden virtauksen katkaisu pato- tai ponttiseinällä
- rakentamalla vesitiivis kaukalo vastaten suunniteltua pohjaveden alentamista
- pohjaveden virtauksen katkaisu injektoinnilla
- pohjaveden virtauksen katkaisu suihkuinjektoinnilla
- pohjaveden virtauksen katkaisu maaperän jäädytyksellä
- pumpatun veden imeytyksellä.

Pohjaveden virtauksen katkaisuun voidaan päätyä, kun halutaan vähentää alikulun kaivantoon suotautuvaa veden määrää ja rajoittaa pohjaveden alennuksesta johtuvia ympäristövaikutuksia.

Alikulurakenne kokonaisuudessaan ja sen mahdolliset pohjaveden virtauksen katkaisurakenteet saattavat sijoittua pohjaveden virtauskenttään nähden haitallisesti, mikä pitää ottaa huomioon alikulkua suunniteltaessa. Huonossa tapauksessa padotavat rakenteet sijoittuvat virtauskenttään siten, että pohjaveden virtausyhteys katkeaa tai huomattavasti heikkenee alikulun toiselta puolelta toiselle.

Myös pohjaveden imeytystä maa- tai kallioperään voidaan käyttää pohjaveden alennuksen ympäristövaikutusten rajoittamiseen. Imeytykseen saatetaan päätyä myös, jos joudutaan syöttämään pohjavettä maaperään, kun pohjaveden virtaus on heikentynyt tai katkennut työnaikaisesti tai pysyvästi alikulun rakentamisen takia. Vettä voidaan imeyttää maaperään ns. pintaimetyksellä tai imeytysaltaiden ja -kaivojen avulla. Imeytyksessä tulee käyttää esikäsiteltyä vettä, joka ei tuki imeytysrakenteita ajan myötä. Imeytyksen suunnittelua ja mitoitusta varten tarkempaa ohjeistusta on saatavilla esimerkiksi julkaisusta Imeyttävä kuivatustekniikka pientaloalueella, VTT Tiedotteita 459 (1985).

4.6 Alikulun rakenneratkaisut

Alikulun eri rakenneratkaisuja harkittaessa tulee ensimmäiseksi määrittää, kuinka paljon pohjavettä tarvitsee alentaa kohteen käytönaikaista tilannetta varten. Tämän jälkeen osoitetaan ennakkotutkimusten avulla, että ko. suunniteltu pohjavedenpinnan pysyvä alentuminen ei aiheuta haittaa ympäristölle. Ympäristövaikutusten kannalta mitoittava pohjavedenpinta on alin havaittu pohjavedenpinta. Alikulun maaleikkauksen leikkausluiskien varmuus tulee myös tällöin tarkastaa.

Mikäli kuitenkin todetaan, että tämä pohjavedenpinnan tason alentuminen aiheuttaa liian suurta haittaa ympäristölle, tulee harkita pohjavedenpinnan tason alenemisen rajoittamista tai kokonaan estämistä käytönaikaisessa tilanteessa alikulkuleikkauksen alapuolelle ja luiskiin tehtävän vesitiiviin pohjavesikaukalarakenteen avulla. Kaukalaratkaisulla voidaan hallitusti rajoittaa pysyvää pohjavedenpinnan alentuminen tai estää aleneminen kokonaan. Kaukalon alle tehdään aina salaojituskerros, johon tarvittaessa asennetaan putkia johtamaan maaperän suotovesiä kaukalarakenteen alitse padotusvaikutuksen estämiseksi.

Alikulun käytönaikaisen tilanteen rakenneratkaisut ja pohjaveden alentumisen esto-rakenteet ovat:

- pohjaveden alennus ojituksen ja salaojien avulla ilman pohjavesikaukaloa
- pohjavesikaukalo, joka voi rakenteeltaan olla
 - bentoniittimattokaukalo
 - geomembraanikaukalo
 - teräsbetonikaukalo
 - komposiittirakenteet ja muut edellisten yhdistelmät
- vedenjohtavuudeltaan alhaiseen maakerrokseen tai kallionpintaan ulottuva ponttiseinä
- edellisten yhdistelmät.

4.7 Hydraulinen murtuminen

4.7.1 Nosteen aiheuttama murtuminen

Nosteen aiheuttama murtuminen tapahtuu, kun huokosvedenpaine rakenteen alla tai pienen vedenläpäisevyyden omaavan maakerroksen alla tulee suuremmaksi kuin keskimääräinen kuormittavien maakerrosten paine (RIL 207–2009). Alikulun rakenteiden mitoituksessa tulee ottaa huomioon noste, kun käytetään geomembraani- tai bentoniittimattoon perustuvaa kaukalorakennetta tai kun alikulun maaleikkaus on tehty koheesio- tai eloperäiseen maahan ja tämän maakerroksen alapuolella on vettä johtavia maakerroksia. Alikulun kaukalorakenteen mitoitus nosteelle tehdään Eurokoodi 7:n ja LVM:n kansallisen liitteen soveltamisohjeen (NCCI 7) mukaisesti. Nostemitoitus tehdään ylimmän havaitun pohjavedenpinnan tason tai suunnitelman mukaisilla toimenpiteillä alennettavan pohjavedenpinnan tason mukaan.

Nosteen aiheuttama murtuminen voidaan estää esimerkiksi seuraavilla keinoilla (RIL 207–2009):

- rakenteen painon lisääminen
- rakenteen ankkurointi alapuolisiin kerroksiin
- vedenpaineiden alentaminen rakenteen kuivatuksella.

Käytettäessä betoni- tai kalvorakenteista pohjavesikaukaloa on yleensä tarpeen rakentaa ulkopuolinen salaojitus, jolla rajoitetaan hallitusti pohjavedenpinnan tasoa kaukalon vieressä. Tällöin kaukalorakenteen yläreuna sijoitetaan salaojituksella rajoitetun, mitoittavan pohjavedenpinnan mukaan. Kaukalon kiertävä salaojitus sijoitetaan jonkin verran kaukalon yläreunan alapuolelle ja mitoitetään siten, että pohjavettä ei pääse virtaamaan kaukaloon. Lisäksi kaukalon alle on rakennettava luotettava salaojitus ja suodatinkerros, joilla estetään pohjavedenpaineen nousu mitoitusarvoa suuremmaksi. Järjestelmän tulee toimia myös maan ollessa roudassa, joten salaojitus on tarvittaessa routasuojattava (Liikennevirasto, 2011).

4.7.2 Hydraulisen nousun ja pohjavesieroosion aiheuttama murtuminen

Kaivannon hydraulinen murtuma (pohjan hydraulinen nousu) on maaperässä tapahtuva ääri-ilmiö, jossa maa menettää lujuutensa ja kantavuutensa ja alkaa "kuohua" sekä voi myös esim. halkeilla. Hydraulinen nousun aiheuttama murtuminen tapahtuu, jos ylöspäin suuntautuvat suotovirtausvoimat ovat niin suuria, että ne ylittävät ylä-

puolella olevan maamassan painon ja tehokas pystyjännitys näin häviää. Hydrauliselle murtumalle herkimpiä maalajeja ovat tasarakeiset karkeat siltit ja hienot hiekat. Kaivantopohjan varmuus hydraulisen nousun aiheuttamaa murtumista vastaan tulee tarkastaa. Sisäinen eroosio on yleensä myös voimakasta hydraulisen murtuman yhteydessä.

Suotovirtaustilanteessa veden virratessa ulos hienorakeisesta maakerroksesta tai karkearakeiseen maalajiin tapahtuu hienon maa-aineksen kulkeutumista rajapinnan läpi. Tätä ilmiötä kutsutaan sisäiseksi eroosioksi eli pohjavesieroosioksi. Se voi käynnistyä, jos suotovoima kasvaa niin paljon, että se ylittää maarakeiden painon. Tällöin hieno maa-aines lähtee liikkeelle ja kulkeutuu veden mukana pois. Tästä seuraa maa-aineksen löyhtyminen ja rakenteen stabiliteetin heikkeneminen. Huonoimmillaan hienon maa-aineksen kulkeutuminen pois rakenteesta johtaa siihen, että pohjaveden virtaus kasvaa, jolloin kuljettaa pois yhä isompia maarakeita. Suotovesien purkautuminen leikkausluiskaan tai sen juureen voi aiheuttaa otollisen tilanteen pohjavesieroosiolle. Pohjaveden alennuksen aiheuttamat muutokset pohjaveden virtauksessa saattavat aiheuttaa maa-aineksen kulkeutumista myös kaivannon ympäristössä. Maalajeista herkimpiä sisäiselle eroosiolle ovat siltti ja hieno hiekka. (RIL 166, 1986; Airaksinen, 1978)

Kaivannon pohjan hydraulinen murtuminen tapahtuu paikallisesti, kun pohjavesieroosion vaikutuksesta pohjaveden mukana siirtyy hienorakeista maa-ainesta. Hydraulinen pohjamurtuma voi tapahtua myös koko maamassassa, jolloin murtumisen tapahtuessa koko maamassa muuttuu juoksevaksi ja käyttäytyy kuin raskas neste, jolla ei ole leikkauslujuutta. Kaivannon pohjan murtuminen voidaan estää pienentämällä hydraulista gradienttia, mikä onnistuu joko pidentämällä veden suotomatkaa tai pienentämällä paine-eroa. Käytännössä mm. seuraavat toimenpiteet tulevat kysymykseen (RIL 95, 1974; RIL 207–2009):

- kaivaminen veden alla
- ponttiseinän lyöminen syvemmälle
- pohjavedenpinnan alentaminen kaivannon ympäristössä
- käännetyin suodatinkerroksen tekeminen kaivannon pohjalle
- vastapainon lisääminen.

Alikulkua suunniteltaessa tulee tarkastaa vakavuus hydraulisen nousun aiheuttamaa murtumista vastaan sekä varmistaa, ettei pohjavesieroosiota pääse muodostumaan Eurokoodi 7:n ja LVM:n kansallisen liitteen soveltamisohjeen (NCCI 7) mukaisesti.

Lähdeluettelo

Airaksinen, J. U. 1978. Maa- ja pohjavesihydrologia. Oulu: Kirjapaino Osakeyhtiö Kaleva. 248 s.

Brassington, R. 2007. Field Hydrogeology. The Geological Field Guide Series. 3rd ed. Chichester, West Sussex, United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd. 264 s.

Engineering Geology Field Manual. Volume 2. 2001. 2nd ed. U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation. 535 s.

Fetter, C. W. 2001. Applied Hydrogeology. 4th ed. Upper Saddle River, New Jersey, USA: Prentice-Hall, Inc. 598 s.

Kairausopas III - Maanäytteiden ottaminen geoteknillisiä tutkimuksia varten. 1984. Suomen geoteknillinen yhdistys ry. 4. ed. Espoo: Otapaino.

Kairausopas IV - Pohjavedenpinnan ja huokosvedenpaineen mittaaminen. 1987. Suomen geoteknillinen yhdistys ry. Helsinki: Rakentajain Kustannus Oy.

Kairausopas V - Porakonekairaus. 1986. Suomen geoteknillinen yhdistys ry. Rakentajain Kustannus Oy. Vammalan kirjapaino Oy.

Kairausopas VI - CPTU/puristinkairaus - puristin-heijarikairaus. Versio 1.00 - 7.6.2001. 2001. Suomen geoteknillinen yhdistys ry. Nummela: Nummelan Kopiopalvelu Oy.

Kruseman, G. P. & de Ridder, N. A. 1994. Analysis and Evaluation of Pumping Test Data. 2nd ed. International Institute for Land Reclamation and Improvement (ILRI), Publication 47. The Netherlands: Wageningen. 377 s.

Leminen, K. 1985. Imeyttävä kuivatustekniikka pientaloalueella. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Tiedotteita 459. Espoo. 51 s.

Liikennevirasto. 2010a. Tiepenkereiden ja -leikkausten suunnittelu. Tien pohjarakenteiden suunnitteluohjeet. Liikenneviraston ohjeita 9/2010. Helsinki: Edita Prima Oy. 107 s.

Liikennevirasto. 2010b. Radanpidon ympäristöohje. Liikenneviraston ohjeita 28/2010. Kuopio: Kopiojyvä Oy. 157 s.

Liikennevirasto. 2011. Eurokoodin soveltamisohje, Geotekninen suunnittelu - NCCI 7. Siltojen ja pohjarakenteiden suunnitteluohjeet. Liikenneviraston ohjeita 12/2011. Helsinki. 70 s.

Luntinen, M. 2010. Lakimies. Liikennevirasto, ympäristöyksikkö. PL 33, 00521 Helsinki. Haastattelu Helsingissä 24.9.2010.

Martio, J. 2011. Pohjavesitilanteen tarkastelu alikulkusilta- ja ympäristöteknikan laitoksella. Diplomityö. Aalto-yliopisto, Insinööritieteiden korkeakoulu, Yhdyskunta- ja ympäristötekniikan laitos. Espoo. 128 s.

Mälkki, E. 1986. Pohjavesi. Teoksessa: Mustonen, S. (toim.): Sovellettu hydrologia. Vesiyhdistys r.y. Helsinki. S. 101–118, 121–151.

Powers, J. P. & Corwin, A. B. & Schmall, P. C. & Kaeck, W. E. 2007. Construction Dewatering and Groundwater Control - New Methods and Applications. 3rd ed. Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons, Inc. 638 s.

Pullinen, A. 2010. Slug-testit Tampereen Sorilassa 22.–23.9.2009 ja Espoon Kulmakorvessa 28.9.–1.10.2009. Geologian tutkimuskeskus (GTK), Etelä-Suomen yksikkö, Maankäyttö ja ympäristö. Arkistoraportti P32.4/2010/2.

RIL 95 Pohjarakennus. 1974. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. Jyväskylä: K. J. Gummerus Oy. 459 s.

RIL 126 Rakennusten ja tonttialueiden kuivatus. 1979. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. Vammala: Vammalan Kirjapaino Oy. 103 s.

RIL 157-I Geomekaniikka I. 1985. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. Espoo: Otapaino. 479 s.

RIL 166 Pohjarakenteet. 1986. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. Hanko: Hangon kirjapaino. 597 s.

RIL 194–1992 Putkikaivanto-ohje. 1992. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. Lahti: Lahden Kirjapaino ja Sanomalehti Oy, "LahtiPrint". 96 s.

RIL 207–2009 Geotekninen suunnittelu - eurokoodin EN 1997-1 suunnitteluohje. 2009. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. Hansaprint Oy. 244 s.

Rintala, J. & Suokko, T. 2008. Pohjavesinäytteenotto - Nykytila ja kehitystarpeet. Suomen ympäristö 48/2008. Suomen ympäristökeskus (SYKE), asiantuntijapalveluosasto. Helsinki: Edita Prima Oy. 65 s.

SFS-EN 1997-2; Eurokoodi 7: Geotekninen suunnittelu. Osa 2: Pohjatutkimus ja koestus. 2007. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. SFS, Helsinki. 156 s.

SFS-käsikirja 179-3; Geotekninen tutkimus ja koestus. Osa 3: Näytteenotto, pohjavesimittaukset ja yleisesti Suomessa käytettävät kenttäkokeet. Menetelmäkuvaukset soveltamisohjeineen 2009. 2009. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. SFS, Helsinki. 203 s.

Suomen Vesi yhdistys. 2005. Pohjavesitutkimusopas - Käytännön ohjeita. Vammalan Kirjapaino Oy. 189 s.

SYKE (Suomen ympäristökeskus). 2010a. Pohjavesimallinnuksessa tarvittavat lähtötiedot. [Verkkosivu, päivitetty 18.5.2010].

SYKE (Suomen ympäristökeskus). 2010b. Nitraatin poisto turkistarha-alueiden maaperästä ja pohjavedestä (NITROS). [Verkkosivu, päivitetty 1.6.2010].

Tielaitoksen selvityksiä 79/1995. 1995. Tieleikkauksen pohjatutkimukset. Geotekniikan informaatiojulkaisuja. Tielaitos, Geokeskus. Helsinki: Painatuskeskus Oy. 50 s. TIEL 3200354.

Tielaitoksen selvityksiä 28/1998. 1998. Teiden pehmeikkötutkimukset. Geotekniikan informaatiojulkaisuja. Tielaitos, Tiehallinto, Tie- ja liikennetekniikka. 90 s. TIEL 3200520.

Tielaitoksen selvityksiä 1/1999. 1999. Siltojen pohjatutkimukset. Geotekniikan informaatiojulkaisuja. Tielaitos, Tiehallinto, Tie- ja liikennetekniikka. Helsinki: Edita Oy Ab. 69 s. TIEL 32000537.

Törnqvist, J. & Juvankoski, M. & Tamminne, M. 2001. CPTU-kairaus. Tien pohja- ja päällysrakenteet tutkimusohjelma 1994–2001, Menetelmäkuvaus TPPT 11. VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka. Tiehallinto. Espoo. 48 s.

Törnqvist, J. & Laaksonen, R. & Juvankoski, M. 2001. Lämpäisevän kerroksen paikallistaminen painumalaskennan tarpeisiin. Tien pohja- ja päällysrakenteet tutkimusohjelma 1994–2001, Menetelmäkuvaus TPPT 12. VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka. Tiehallinto. Espoo. 14 s.

Vakkilainen, P. 2007. Maan hydraulisen johtavuuden määrittäminen. Opetusmoniste: Yhd-12.132 Kuivatus ja kastelu, syyslukukausi 2007. Laboratorioharjoitus. Teknillinen Korkeakoulu (TKK), Vesitalous ja vesirakennus, Espoo.

Vantaan kaupunki, Kuntatekniikan keskus. 2009. [Kuva on saatu Vantaan kaupungilta 19.10.2009].

Vesitalouden verkkokirja. 2010. Teknillinen Korkeakoulu (TKK). TKK, Yhdyskunta- ja ympäristötekniikan laitos, Vesitalous ja vesirakennus. [Verkkójulkaisu, viitattu 19.10.2010].

Analyttiset menetelmät

Likimääräiskaavat työnaikaisessa tilanteessa

Pumpattavat vesimäärät

Vapaan akviverin vettä läpäisevän maakerroksen alareunaan ulottuvaan "täydelliseen" suodatinkaivoon virtaavalle vesimäärälle Q saadaan kaava (5) (Airaksinen, 1978; RIL 95, 1974).

$$Q = \frac{\pi k (h_0^2 - h_w^2)}{\ln(R/r_w)} \quad (5)$$

R on	pumppauksen vaikutusalueen säde [m]
r_w	kaivon säde [m]
k	vedenläpäisevyyskerroin [m/s]
h_0	alkuperäinen pietsometrinen korkeus
h_w	kaivon pietsometrinen korkeus.

Pohjaveden virratessa paineellisena maakerroksessa (jonka paksuus b), jota rajoittavat kaksi läpäisemätöntä kerrosta, voidaan kaivoon suuntautuva virtaama Q laskea kaavalla (6), kun b on vakio (RIL 95, 1974; Airaksinen, 1978).

$$Q = \frac{2\pi \cdot b k (h_0 - h_w)}{\ln(R/r_w)} \quad (6)$$

b on maakerroksen paksuus, jossa pohjavesi virtaa paineellisena [m].

Edellisistä kaavoista saadaan lasketuksi arvio pumppausvirtaamalle yhdestä kaivosta pumpattaessa. Alennettaessa pohjavettä siten, että kaivanto ympäröidään useammalla kaivolla, voidaan ajatella kaivannon olevan yksi iso kaivo ja korvata se laskelmissa pinta-alaltaan yhtä suurella ympyrällä. Tällöin voidaan kaavojen (5) ja (6) kaivojen säteet (r_w) korvata tämän ympyrän säteellä A . Tämä oletus pitää paikkansa parhaiten, kun kaivot ovat kaivannossa lähekkäin toisiaan, ympyränmuotoisesti sijoitettuina. Mikäli kaivot on sijoitettu suorakulmion muotoiseen kaivantoon, voidaan kaivon säteen (r_w) sijasta myös käyttää arvoa A , joka saadaan kaavasta (7). Pumppausvirtaamien kaavat ovat tällöin muotoa (8) ja (9), (Powers et al. 2007; RIL 95, 1974).

$$A = \sqrt{\frac{L \cdot B}{\pi}} \quad (7)$$

L on	suorakulmaisen kaivannon pituus
B	suorakulmaisen kaivannon leveys.

$$Q = \frac{\pi k (h_0^2 - h_w^2)}{\ln(R/A)} \quad (8)$$

$$Q = \frac{2\pi \cdot bk(h_0 - h_w)}{\ln(R/A)} \quad (9)$$

Mikäli kaivannon pituus (L) on kuitenkin hyvin pitkä verrattuna leveyteen (B) eli L/B-suhteen ollessa suuri, voidaan kaavoja (8) ja (9) silti käyttää edellyttäen, että ympyrän säteen A sijasta käytetään kaavaa (10). Tämä kaava vastaa vettä läpäisevän maa-kerroksen alareunaan asti ulottuvaa suodatinkaivoa. Jos kaivon alapuolella on vettä läpäisevää maata, on kaavasta saatavaa pumppausmäärää Q korotettava 10...30%. (RIL 95, 1974).

$$A = B(0,4 + 0,2L/B) \quad (10)$$

Sichardtin mukaan suodatinkerroksen läpi virtaavan suurin vesimäärä saadaan kaavalla (11). Suodatinkerroksen ns. vastaanottokyky (f) lasketaan suodatinkerroksen vaippapinta-alan m²:ä kohti.

$$f = \sqrt{k}/15 \quad (11)$$

f on suodatinkerroksen vastaanottokyky [m³/s]
k vedenläpäisevyyskerroin [m/s].

Kaivosta saatava suurin vesimäärä Q_{max} voidaan laskea kaavasta (12) (RIL 95, 1974).

$$Q_{\max} = 2\pi \cdot r_w h_o' \sqrt{k}/15 \quad (12)$$

r_w on kaivon säde sorasuodatinkerros mukaan luettuna [m]
h_{o'} veden kanssa kosketukseen tulevan siiviläputken osan korkeus [m].

Kun suodatinsorakerroksen uloin osa saattaa tukkeutua, voidaan sen vastaanottokykyä arvioitaessa ottaa huomioon puolet sorakerroksen paksuudesta. Széchyn mukaan voidaan kaava (12) muokata kaavan (13) muotoiseksi (RIL 95, 1974).

$$Q_{\max} = 0,9(h_w + h_k)\pi \cdot r_o \sqrt{k}/15 \quad (13)$$

h_w on veden syvyys kaivossa [m]
h_k ≈ (h_o + h_w)/2 [m].

Peruskaivannon muodolla on käytännössä suhteellisen pieni vaikutus vesimäärään.

Pumppauksen vaikutusetäisyys

Kaivon ympärille muodostuneen vedenpinnan syvennyksen säde eli pumppauksen ns. ulottuvuus on yleensä vapaassa akviferissa pienempi kuin paineellisessa akviferissa. Pumppauksen ulottuvuus riippuu myös vedenotosta, pumppauksen kestoajasta ja kaivon rakenteesta. Pumppauksen ulottuvuuden (R_i) voi laskea yhden kaivon tapauksessa kaavalla (14). (RIL 95, 1974)

$$R_1 = c\sqrt{kHt/n} \quad (14)$$

R_1 on yhden kaivon ympärille syntyvän vedenpinnan syvennyksen säde [m]
 t pumppauksen kesto aika [vrk]
 c kerroin 1,5...3 väliltä (Weberin mukaan $c = 3$ tapauksissa, jolloin t on 3...10 vrk)
 n huokoisuus.

Sichardtin mukaan pumppauksen ulottuvuuden R voidaan likimäärin laskea kokemusperäisestä kaavasta (15) (RIL 95, 1974).

$$R = 3000s\sqrt{k} \quad (15)$$

s on vedenpinnan suunniteltu alennus [m]
 k vedenläpäisevyyskerroin [m/s].

Kaava (15) johtaa havaintojen mukaan yleensä oikeaan vesimäärään, jos kyseessä on suhteellisen suuri alennus ($s \geq 5$ m) (RIL 95, 1974). Avonaisen veden läheisyydessä voi pumppauksen ulottuvuus olla korkeintaan kaavan (16) mukainen (RIL 95, 1974).

$$R = 2e \quad (16)$$

e on vesistön rannan ja kaivoryhmän painopisteen välinen etäisyys.

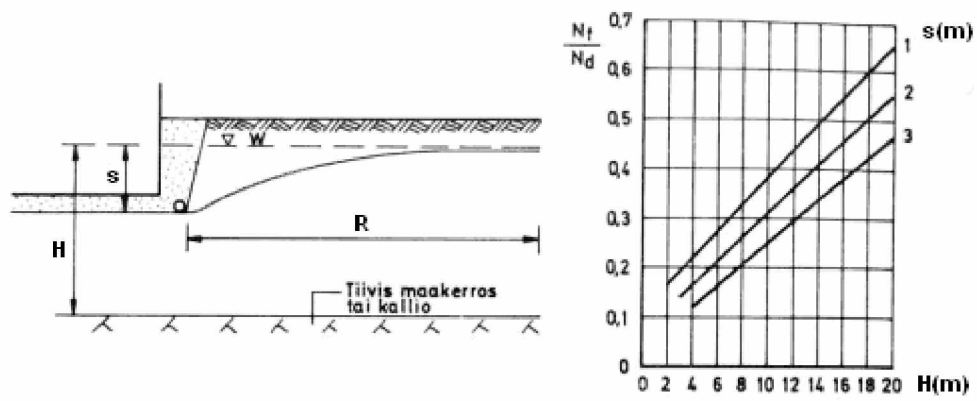
Likimääräiskaavat käyttötilanteessa

Alikulkurakenteen kuivatuksen takia salaojasta pumpattava vesimäärä q [m³/s·m] pituusyksikköä kohti voidaan arvioida likimäärin kaavalla (17). Kaavassa olevalle N_f/N_d -suhteelle saadaan likiarvo hiekkamaassa kuvan 8 käyristä. Pohjavedenpinnan alenemisen ulottuvuus R [m] salaojista voidaan arvioida kokemusperäisellä kaavalla (18). Kaavoilla voidaan arvioida salaojilla kuivatettava vesimäärä ja pohjaveden alentamisen ulottuvuus homogeenisessa, kohtalaisesti vettä läpäisevässä maassa (karkea siltti, silttinen hiekka, hiekka- ja sora- ja turve) ja hyvin vettä läpäisevissä maassa (sora, hiekka), jos kuivatustaso ei ole paljoa pohjavedenpinnan alapuolella (RIL 126, 1979).

$$q = ks \frac{N_f}{N_d} \quad (17)$$

$$R = 2000 \cdot s\sqrt{k} \quad (18)$$

k on vedenläpäisevyys [m/s]
 s pohjavedenpinnan suunniteltu alennus [m]
 H vettä läpäisevän maakerroksen paksuus [m]
 N_f/N_d virtausviiva-ekvipotentiaali-käyrästä saatava suhdeluku, jonka likiarvo hiekkamaissa saadaan kuvasta 8.



Kuva 7. N_f/N_d -suhteen likiarvoja hiekkamaassa (RIL 126, 1979).

